

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robototechniky

Konstrukce paralelního manipulátoru se čtyřmi stupni
volnosti

Design of the Parallel Manipulator with Four Degrees of
Freedom

Student:

Bc. Pavel Dolejší

Vedoucí diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Vladimír Mostýn

Ostrava 2013

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Dolejší**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T013 Robotika
Téma: **Konstrukce paralelního manipulátoru se čtyřmi stupni volnosti**
Design of the Parallel Manipulator with Four Degrees of Freedom

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te analýzu možností konstrukce školního paralelního manipulátoru typu Delta se čtyřmi stupni volnosti, určeného pro demonstrační účely. Na základě této analýzy stanovte vhodné parametry paralelního manipulátoru s ohledem na jeho snadnou přenositelnost.
2. Navrhněte varianty řešení paralelního manipulátoru z hlediska použitých pohonů, typů kinematických vazeb i vhodného řídicího systému.
3. Vybrané koncepční řešení rozpracujte do úrovně detailního 3D modelu a podkladů pro výrobu s využitím technologie Rapid Prototyping.
4. Práci doplňte podrobnou technickou dokumentací. Výkresovou dokumentaci vypracujte dle pokynů vedoucího práce.
5. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD a konstrukční řešení v CAD systému (podle pokynů vedoucího).

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Skařupa, J. – Mostýn, V. *Teorie průmyslových robotů*. 1. vydání. Košice: Viena Košice, 2000. 146 s. ISBN 80-88922-35-6.
2. Merlet, J.P. *Parallel Robots*. Second Edition. Dordrecht : Springer, 2006. 394 pp. ISBN-10 1-4020-4133-0 (e-book). Dostupné z: <http://eketab2.files.wordpress.com/2007/10/parallelrobots.pdf>
3. Lung-Wen Tsai *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. New York : John Wiley & Sons, 1999. 520 pp. ISBN 0-471-32593-7

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr.Ing. Vladimír Mostýn**

Datum zadání: 31.10.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013

prof. Dr.Ing. Petr Novák
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě20.5.2013.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20.5.2013


.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Pavel Dolejší

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Kovalčíkova 813
Petřvald

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DOLEJŠÍ, Pavel. *Konstrukce paralelního manipulátoru se čtyřmi stupni volnosti*. Ostrava, 2013. 82 s. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky

Diplomová práce se zabývá návrhem malého paralelního robotu a jeho realizací. V úvodu práce představuje shrnutí nejzajímavějších kinematických struktur paralelních robotů a představuje vhodné pohony. Následuje popis tvorby robotu, od prvních CAD návrhů, přes popis vyráběných dílů až po sestavení a naprogramování řídicího systému. V průběhu celé práce je kladen důraz na porovnání teorie s praxí, identifikaci problémů a snaze je vyřešit. Výsledkem práce je realizovaný robot, jeho popis a nejnutnější výrobní dokumentace.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

DOLEJSI, Pavel. *Design of the Parallel Manipulator with Four Degrees of Freedom*. Ostrava, 2013. 82 p. Diploma Thesis. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics

Diploma thesis deals with design and realization of small scale parallel robot. In the beginning of work are introduced various possible kinematic structures and usable drives. Following is description of the robot creation process, from first CAD concepts, through description of manufactured parts up to creation and programming of a control system. Throughout whole thesis emphasis is taken on comparing the theory with practical results, identification of problems and proposals of their solution. Output of diploma thesis is the realized robot, its description and necessary documentation.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
0 Úvod	9
1 Analýza současného stavu	10
1.1 Paralelní robotické struktury.....	10
1.1.1 Charakteristiky běžných/sériových typů robotů	10
1.1.2 Charakteristika paralelních robotů	11
1.1.3 Možnosti uspořádání paralelních robotů.....	13
1.2 Pohony	18
1.2.1 Rotační	18
1.2.2 Lineární.....	22
2 Požadavkový list	26
3 Varianty řešení	27
3.1 Kinematická struktura:	27
3.1.1 Rozhodovací proces:	27
3.2 Pohonné jednotky	28
3.2.1 Rozhodovací proces:	29
3.3 Praktický test modelářského serva	29
3.3.1 Předběžný výpočet.....	29
3.3.2 Výběr a bližší popis modelářského serva	31
3.3.3 Kontrolní výpočet ložisek	33
3.3.4 Provozní test.....	34
3.3.5 Analýza komunikačního protokolu.....	35
4 Popis CAD 3D modelu	42
5 Popis konstrukce	46
5.1 Sestava	46
5.2 Podsestavy	47
5.2.1 Ramena	47
5.2.2 Horní rám	49
5.2.3 Spodní rám	50
5.2.4 Spodní plošina s efektozem.....	51
5.3 Popis dílů	53
5.3.1 Tištěné díly	53
5.3.2 Netištěné díly	63
6 Řízení robotu	67

6.1	Hardware.....	67
6.1.1	Zdroj signálu – Pololu Mini Maestro 18	68
6.1.2	Bluetooth modul HC-06	69
6.1.3	Nastavení serv	70
6.2	Inverzní úloha.....	71
6.3	Software	72
6.3.1	Obecný princip programu	72
6.3.2	Řídicí program pro PTP řízení.....	74
6.3.3	Řídicí program pro spojitě řízení	75
6.3.4	Další vývoj.....	77
7	Praktické zkušenosti a poznatky z provozu robotu.....	78
8	Cenové zhodnocení.....	79
9	Závěr.....	80
10	Seznam použité literatury.....	81
11	Seznam příloh.....	83

Seznam použitých značek a symbolů

R_1	Reakční síla na ložisku 1	[N]
R_2	Reakční síla na ložisku 2	[N]
L_{10}	Základní trvanlivost ložiska	[ot.]
C	Základní dynamická únosnost	[N]
X_1	Jednotkový vektor ve směru osy x	[-]
Y_1	Jednotkový vektor ve směru osy y	[-]
r	Délka první části ramene	[m]
ρ	Délka druhé části ramene	[m]
β	Úhel natočení první části ramene	[°]
$\mathbf{A}_0\mathbf{A}$	Vektor první části ramene	[-]
$\mathbf{A}_0\mathbf{B}$	Vektor od počátku ke koncovému bodu	[-]
\mathbf{AB}	Vektor druhé části ramene	[-]

0 Úvod

Průmyslová robotika představuje jednu z klíčových oblastí moderní výrobní praxe. Průmyslové roboty je možné použít všude tam, kde je žádoucí člověka vyloučit z výrobního procesu pro jeho bezpečnost nebo pro zvýšení rychlosti a kvality. Po stránce vykonávaných oblastí téměř není možné najít technologii, která již dříve nebyla alespoň experimentálně robotizována. Přes tuto pestrost je ale pozoruhodné, jak málo kinematických struktur robotů se běžně rozšířilo. Drtivou většinou z nich jsou sérové roboty s angulární strukturou.

Kontrastem vůči těmto strukturám je pomalu rozbíhající se úspěch zcela jiného typu robotů, a sice robotů paralelních. Paralelní roboty mají v některých oblastech mnohem lepší výsledky než roboty sériové, nicméně z různých důvodů měly tyto typy velké problémy se prosadit, což se odrazilo i na všeobecném povědomí a možnostech výuky v rámci strojírenským oborům, kde jsou paralelní roboty zpravidla ignorovány.

Toto ale naštěstí není pravda na katedře robototechniky Vysoké školy báňské. Katedra pečlivě studuje nejnovější trendy ve výrobě a snaží se dělat maximum pro výuku studentů. Co se týče paralelních robotů, byl před nedávnem zakoupen jeden kus profesionálního průmyslového paralelního robotu pro výuku studentů. Současně ale byla zadána tato diplomová práce, jejímž účelem by mělo být vytvořit přenosnou alternativu, použitelnou například pro prezentace mimo areál univerzity.

Náplní práce je jednak teoretický rozbor a shrnutí existujících řešení, ale také návrh a následná realizace robotu. Nejedná se tak o pouze teoretickou práci, ale o dokument, jehož výstupem je skutečný, hmatatelný robot.

První část diplomové práce se zabývá rozбором současných realizovaných i nerealizovaných paralelních kinematických struktur za účelem vytvoření povědomí. V další navazující části se práce věnuje pohonům, jejich vhodnosti pro konkrétní aplikace a výběru použitelných typů. Na rozbor navazuje krátké představení uvažovaných variant a výběr vhodné struktury k realizaci.

Další části práce jsou řazeny převážně chronologicky, podle pořadí v jakém existovaly ve výrobním procesu prototypu robotu. Na počátku je CAD 3D model, následovaný popisem konstrukce a poznatky z realizace. Na to navazuje řízení robotu, a to jak v HW tak SW rovině. Na konci práce pak následuje krátké zhodnocení dosažených parametrů robotu a zjištěné problémy.

1 Analýza současného stavu

Rešerše se zabývá dvěma důležitými tématy. Prvním z nich jsou paralelní robotické struktury. Analýza shrnuje co to je za struktury, jaké mají výhody, a ukazuje možné konstrukce. Zároveň se snaží vytipovat některé typy paralelních struktur, které by byly vhodné pro realizaci, anebo jsou některou svou vlastností zajímavé.

Druhým tématem rešerše jsou pohony. U většiny robotů představují klíčovou součást a zpravidla z velké části určují provedení robotu a jeho vlastnosti. Proto je důležité shrnout vlastnosti a použitelnost různých pohonů pro paralelní robot menších rozměrů, a vytipovat vhodné jednotky, které by mohly být zahrnuty do variantního výběru řešení.

1.1 Paralelní robotické struktury

1.1.1 Charakteristiky běžných/sériových typů robotů

Přestože robotika jako obor se věnuje velmi širokému spektru oblastí a mechanismů, roboty v konvenčním smyslu mívají až pozoruhodně jednotvárnou konfiguraci. Zpravidla jde o antropomorfní ramena se sériovým uspořádáním, podobně jako lidská paže. Protože lidské poznání a technika zpravidla vychází z přírody a přirozeného uspořádání světa, je tato zjevná inspirace dobře patrná a vzhledem ke své intuitivnosti ani není na škodu. Antropomorfní ramena mají celou řadu vlastností, které si nyní rozebereme.



Obrázek 1-1: Sériový robot ABB IRB140

V současnosti zcela nejčastější koncepcí jsou roboty angulární, základní vlastnosti se ale zpravidla shodují i s roboty sférickými, cylindrickými a jinými. Jde o roboty takzvané sériové. Konstrukce bývá tvořena sekvencí tuhých ramen, vzájemně svázaných rotačními nebo lineárními vazbami. Počet kloubů a s ním související počet stupňů volnosti se liší. Zatímco dříve byly běžné roboty s třemi až čtyřmi stupni volnosti, dnes jsou typické roboty s pěti nebo šesti stupni volnosti, výjimečně i více.

Typický průmyslový robot se šesti stupni volnosti má klouby rozdělené do dvou relativně nezávislých skupin – polohovacího a orientačního ústrojí. Přestože z praktického hlediska nebývají tato ústrojí zcela nezávislá, klouby orientačního ústrojí bývají zpravidla menší a umístěny na konci robotu, zatímco klouby polohovacího ústrojí bývají masivnější a na jejich umístění zpravidla tolik nezáleží, respektive je ovlivněno pouze požadovaným tvarem pracovního prostoru.

Pohony kloubů bývají nejčastěji umístěny na předchozím článku robotu a to buď u všech kloubů, nebo také často pouze u polohovacího ústrojí zatímco pohony orientačního ústrojí jsou společně na druhém rameni a ke kloubům jsou připojeny pomocí převodů. Důvodem tohoto uspořádání je především jednoduchost konstrukce a řízení, protože pohyb konkrétního kloubu závisí pouze na

pohybu jemu příslušejícího kloubu. Dost často se také motorů používá jako vahadla, k částečnému vyvažování hmotnosti ramene

Nevýhodou tohoto uspořádání je ale velká hmotnost ramen, kvůli hmotě motorů. V případě nutnosti práce ve stísněných prostorech je zásadní i velikost, kdy motory na ramenech mohou zbytečně překážet. Oba tyto problémy částečně řeší uspořádání robotu s pohony v základně, ale pouze za cenu nutnosti použití velmi složitých převodů pro rozpojení pohonů a zajištění nezávislosti pohybů kloubů. Složitost převodů navíc exponenciálně roste s počtem stupňů volnosti, a proto jsou tyto roboty používány pouze výjimečně.

Kromě toho ani uspořádání s pohony v základně nedokáže zcela odstranit další nevýhody tohoto typu robotů, společné pro všechny sériové roboty. Jde o malý poměr nosnosti k hmotnosti robotu, nízkou přesnost, nízkou tuhost a nemožnost jednoduše škálovat velikost podle požadavků.

U sériového robotu je každé rameno nesené ramenem předchozím, každé rameno tak nese kromě váhy objektu manipulace (OM) i hmotnost všech předchozích ramen. Pokud vezmeme v úvahu fakt, že každé další rameno tak musí být i masivnější aby tuto hmotnost uneslo, zjistíme, že zatížení roste exponenciálně s počtem ramen. Běžné typy robotů tak mají poměr nosnosti k hmotnosti 0,1 nebo i méně. Věci neprospívá ani to, že v zájmu zvýšení přesnosti a tuhosti bývá konstrukce ramen masivnější, než by pro dané zatížení bylo nutné.

Přesnost a tuhost je daná přesností a tuhostí pohonů a tuhostí ramen. Přesnost polohování motorů není nekonečná a v případě použití převodovky se může objevit i vůle v chodu nebo nižší tuhost. Ramena se pak vlivem zatížení mohou deformovat. Přestože deformace ramen, vůle i nepřesnost pohonů mohou být velmi malé, vzhledem k sériovému uspořádání robotu se vzájemně sčítají a v koncovém bodě už mohou dosáhnout nepřijatelné nepřesnosti. Výrobci robotů se tuto vlastnost snaží omezit použitím různých typů senzorů, jako jsou třeba tenzometry nebo laserové skenery, nicméně toto už komplikuje a prodražuje celý systém.

Určitou výjimkou v tomto bodě jsou roboty typu SCARA, u kterých je vzhledem k uspořádání omezen vliv nepřesnosti pohonů a to tím, že pohony nepřenáší žádné tíhové zatížení. Díky tomu jsou SCARA roboty neobvykle přesné a často používané pro montážní účely. Ani SCARA ale není ušetřena deformací v ramenech a jejich sčítání vlivem sériové struktury.

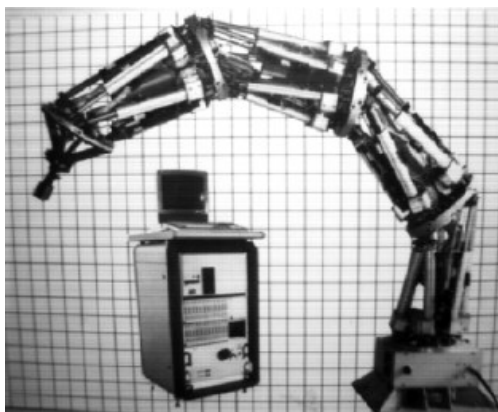
Poslední uvedenou nevýhodou sériových robotů je jejich škálovatelnost. Vzhledem k univerzálnosti robotů je důležité, aby existovaly v různých velikostech a tvarech, odpovídajících požadované funkci. Přímocarám řešením by bylo navrhnout jeden typ robotu a ten už jen zvětšovat nebo zmenšovat podle požadavků. U sériových robotů ale tento přístup není možný. Hlavní roli hraje setrvačný moment ramen, který je závislý na druhé mocnině jejich délky. A protože každé rameno musí nést hmotnost a setrvačnost všech předchozích ramen, mění se skutečné zatížení s ještě vyšší mocninou. Věci přitom nepomáhá ani to, že třecí síly zůstávají relativně konstantní bez ohledu na velikosti robotů.

Většinu těchto problémů úspěšně řeší paralelní struktura robotů.

1.1.2 Charakteristika paralelních robotů

Paralelní roboty, jsou roboty uspořádané tak, že koncový bod robotu je se základnou spojen několika samostatnými kinematickými řetězci. Kinematické řetězce tvoří dohromady uzavřené smyčky. Paralelní roboty se mohou dále dělit na čistě paralelní, u kterých žádný kinematický řetězec není nesen jiným řetězcem, nebo na serio-paralelní, kombinující vlastnosti sériových a

paralelních struktur. Typickým příkladem mohou být buď sériově řazené paralelní struktury (Obrázek 1-2) nebo sériové orientační ústrojí na konci paralelního manipulátoru (Obrázek 1-3).



Obrázek 1-2: Serio-paralelní robot Logabex



Obrázek 1-3: Serio-paralelní robot ABB IRB360 FlexPicker

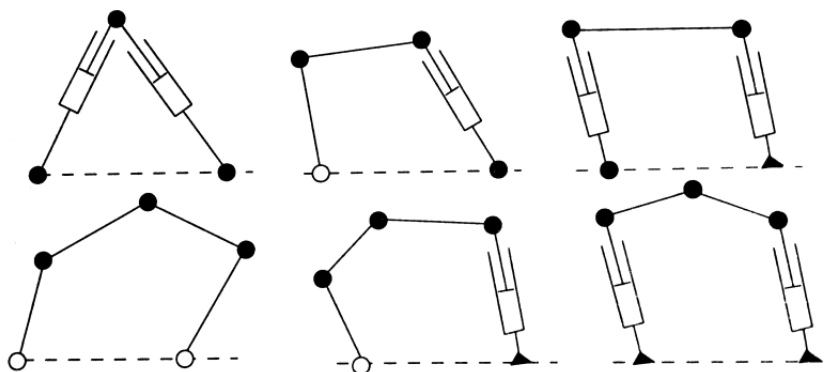
Hlavní výhodou paralelních robotů je, že se zátěž vždy rozkládá na všechny řetězce, respektive ramena robotu. Rameno paralelního robotu vždy přenáší pouze část hmotnosti OM, na rozdíl od sériového robotu, kde každý člen vždy přenáší celou hmotnost. Díky tomu jsou paralelní ramena mnohem méně zatěžována a tak může mít robot mnohem větší nosnost i tuhost. Samotné kinematické řetězce jsou navíc i jednodušší takže má robot vyšší přesnost a dá se snáze škálovat jeho velikost. [1]

Existuje velké množství možných uspořádání a s ním i různé vlastnosti, nicméně dají se najít i nevýhody společné pro většinu paralelních robotů. Obvykle jde o omezený pracovní prostor (v porovnání se sériovými roboty), daný jednoduššími kinematickými řetězci, a o složitější řízení (opět v porovnání se sériovými roboty). Omezený pracovní prostor lze částečně vykompenzovat serio-paralelními strukturami nebo redundantními kinematickými řetězci. Složitost řízení je daná tím, že poloha koncového bodu závisí vždy na poloze všech ramen a tento způsob řízení je pro člověka neintuitivní. Velký vliv má ještě to, jestli jsou kinematické řetězce vzájemně nezávislé nebo ne. U nezávislých řetězců je možné řídit jednotlivé pohony samostatně. U závislých je nutné pohybovat vždy všemi členy současně. V současné době už ale je možné svěřit řízení paralelních robotů počítačům, které provedou všechny potřebné výpočty za člověka. Nevýhoda složitějšího řízení tak do určité míry odpadá.

1.1.3 Možnosti uspořádání paralelních robotů

1.1.3.1 Rovinné manipulátory

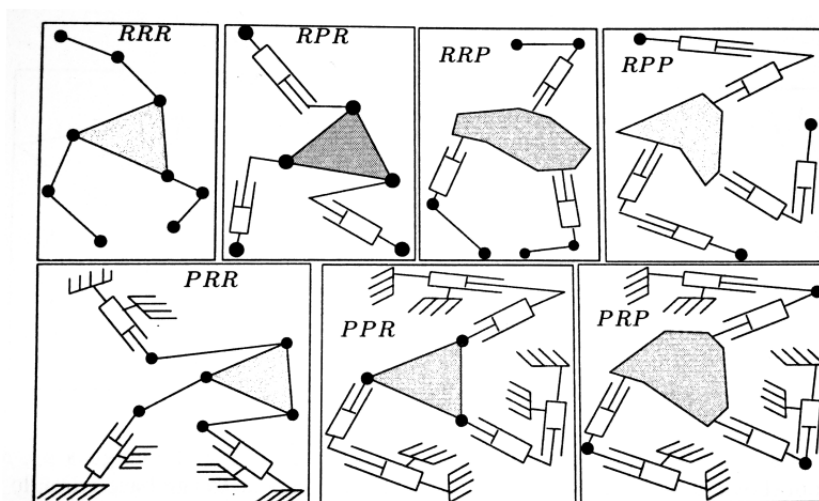
Nejjednoduššími paralelními strukturami jsou rovinné paralelní manipulátory se dvěma a třemi stupni volnosti. Příklady šesti základních kinematických struktur manipulátorů se dvěma stupni volnosti (2DOF) jsou na následujícím obrázku (Obrázek 1-4)



Obrázek 1-4: Rovinné manipulátory s 2DOF

Nejedná se o plný výčet všech možných kombinací, jsou uvedeny pouze struktury s pohony u základny. Velkého množství dalších kombinací by bylo možné dosáhnout prostou změnou umístění poháněného kloubu, ať už rotačního nebo lineárního.

Obdobným způsobem je možné odvodit celou řadu struktur se 3DOF. Obrázek 1-5 zachycuje příklad kinematických struktur.



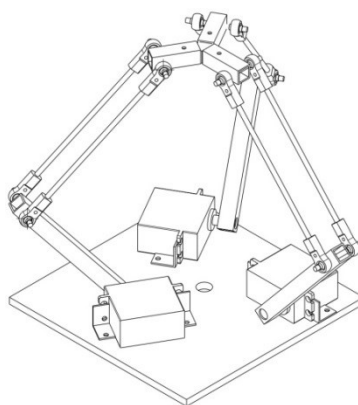
Obrázek 1-5: Rovinné manipulátory s 3DOF

Kromě uvedených typů je možné sestavit i celou řadu jiných konstrukcí jak se dvěma tak i třemi stupni volnosti. Stejně jako pro tuto práci ale jsou manipulátory prostorové, proto přejdeme k nim.

1.1.3.2 Prostorové manipulátory s 3DOF

Nejnámějším příkladem prostorového paralelního robotu se třemi stupni volnosti je robot Delta, (Obrázek 1-6) [2]. Původní Delta robot byl vyvinut na École Polytechnique v Lausanne v 80. letech jako robot pro velmi rychlou manipulaci s lehkými objekty. V klasickém uspořádání se robot skládá ze tří rotačních pohonných jednotek na základně s prvním článkem ramene směřujícím ven. Druhý článek je paralelogram skládající se ze dvou ramen připojených na obou koncích kulovým

kloubem. Konce tří paralelogramů jsou spojené koncovou plošinou s koncovým bodem robota. Toto uspořádání umožňuje translační pohyb ve všech třech osách a neumožňuje rotaci okolo žádné osy. Všechny tři pohony jsou přitom na sobě zcela nezávislé.



Obrázek 1-6: Robot typu Delta

Kromě standardní Deltý existuje i celá řada upravených variací. Například je možné změnit natočení ramen ze symetrického uspořádání s rozestupy 120° do uspořádání s dvěma rameny přímo proti sobě a třetím kolmo k nim. Za cenu určité ztráty tuhosti se tím zjednoduší řízení robotu v kartézském systému. Je možné přidat i rameno čtvrté, díky kterého se zachová vysoká tuhost a zůstane jednoduché řízení v kartézském systému, ale za cenu ztráty nezávislosti pohonů.

Také je možné nahradit rotační pohony lineárními, změnit pořadí prvků atd. Zajímavou možností je i vnesení redundantních pohonů jako například u robota Speed-R-Man (Obrázek 1-7). Redundance může značně zvětšit pracovní prostor robotu i jeho rychlostní charakteristiky.



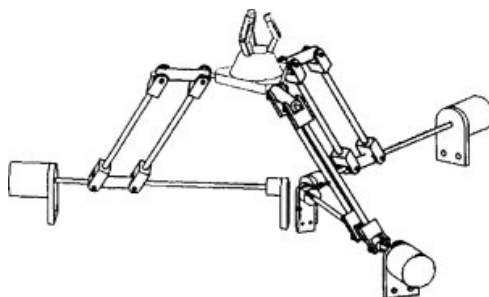
Obrázek 1-7: Speed-R-Man

Z hlediska polohovacích schopností a vlastností připomíná Delta hodně robot SCARA a používá se i ke stejnému účelu. Na rozdíl od Scara robotů ale chybí čtvrtý stupeň volnosti – rotace okolo svislé osy. Většina výrobců toto řeší pomocí sériově vřazené čtvrté osy na koncové plošině, poháněné zpravidla hřídelí ze základny robotu. Takto ale už nejde o čistě paralelního robota ale o robota serio-paralelního, přestože čtvrtá osa má jen minimální negativní vliv. Výjimečně se objevují i konstrukce s více přidanými osami.

Roboty typu Delta jsou hojně rozšířeny a většina významných výrobců robotů alespoň jeden robot tohoto nebo podobného typu má v nabídce. Typickým příkladem je robot ABB IRB360 (Obrázek

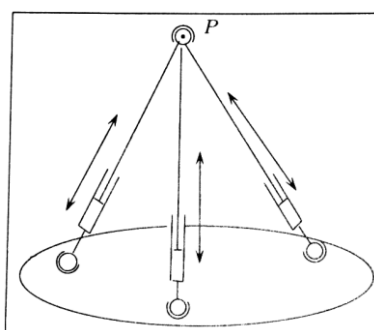
1-1). Příkladem Delta robotu s šesti stupni volnosti (s tříosým sériovým polohovacím ústrojím) je Fanuc M-1iA.

Dalším příkladem paralelního 3DOF robotu je robot Star (Obrázek 1-8)[3]. Jde o robot částečně vycházející z Delty, ale pohon je tvořen trojicí pohybových šroubů. Jsou rovněž použity paralelogramy, avšak v jiném uspořádání.



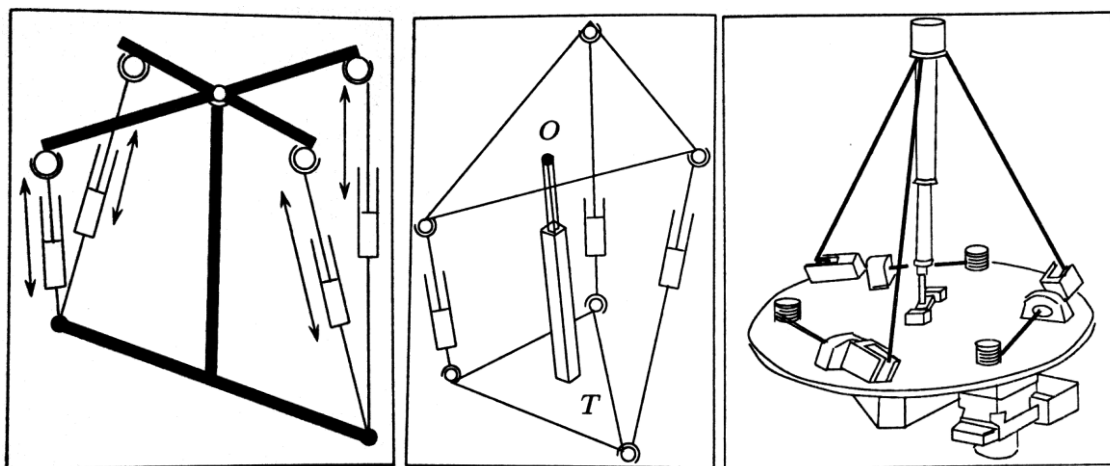
Obrázek 1-8: Robot Star

Zajímavým a přitom teoreticky velice jednoduchým konceptem je manipulátor tvořený pouze lineárními aktuátory v kulových kloubech, tak, jak je zobrazen níže (Obrázek 1-9). Bohužel jeho jednoduchost je pouze teoretická, protože v praxi neexistuje prakticky použitelný trojitý kulový kloub. Existují mechanismy, které jej dokáží nahradit, nicméně pouze za cenu velké technické složitosti.



Obrázek 1-9: Manipulátor s trojitým kulovým kloubem

Obrázek 1-10 ilustruje další zajímavé koncepty robotů s 3DOF. Struktury jsou převzaty z [1]



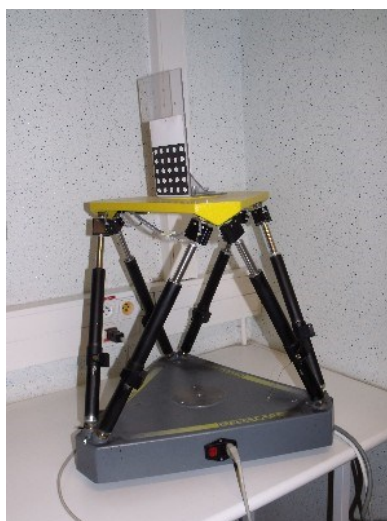
Obrázek 1-10: Roboty s 3DOF

V žádném případě nejde o vyčerpávající výčet všech možných koncepcí, pouze o výběr významných a zajímavých typů.

1.1.3.3 *Prostorové manipulátory s více stupni volnosti*

Do této kategorie patří manipulátory s čtyřmi, pěti a všemi šesti stupni volnosti. Čtyřstupňové manipulátory se občas vyskytují jako prostředek k polohování různých plošin, typicky leteckých simulátorů. Praktické využití ve formě robotu ale je vzácné a používá se pouze ve speciálních případech. Ještě vzácnější jsou struktury s pěti stupni volnosti. Přestože existují návrhy takových struktur, v praxi se téměř nikdy nepoužívají kvůli dostupnosti a probádanosti šestistupňových manipulátorů.

Šestistupňové paralelní roboty tvoří velmi významnou a velkou skupinu manipulátorů. Mají výbornou nosnost, tuhost i přesnost a v podobě různých polohovacích závěsů, stolů nebo speciálních manipulátorů se používají už desítky let. Nejtypičtějším zástupcem této skupiny je manipulátor vyskytující se pod názvem Goughova nebo Stewartova platforma, případně jako robot typu Hexapod (Obrázek 1-11)[4].

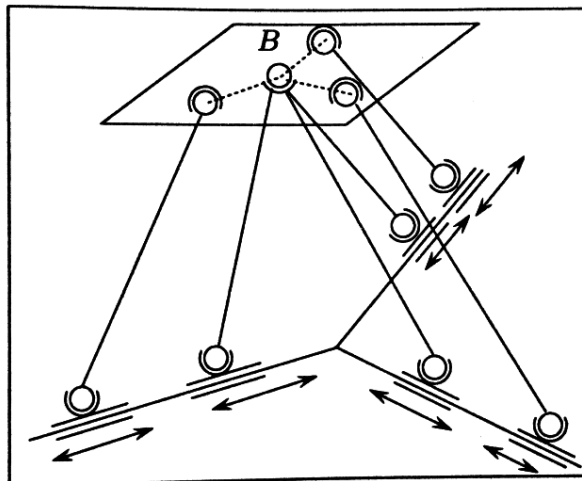


Obrázek 1-11: Goughova platforma – Hexapod

Hexapod je tvořen horní a dolní trojúhelníkovou platformou, mezi kterými je šestice lineárních pohybových jednotek tak, jak je patrné z obrázku. V klasické podobě jde o hydraulické válce, může ale jít i o pohybové šrouby, umělé svaly a jiné. Válce jsou s platformami na obou koncích spojené kloubovou vazbou.

Výhodou tohoto typu robotu je až extrémní jednoduchost, robustnost a přitom relativně velká váha. Nevýhodou je relativně malá pohyblivost, díky které je jeho samostatná pohyblivost v robotice značně omezená. S výhodou se ale dá použít jako vysoce přesný polohovací stůl nebo například jako orientační ústrojí na konci ramene sériového robota. Vzhledem k vysoké nosnosti a nízké hmotnosti je rovněž možné tyto roboty na sebe navrstvit do jakéhosi chobotu. Příkladem může být robot Logabex LX4 (Obrázek 1-2) s nosností 75kg při vlastní hmotnosti pouze 120kg [5]. Nevýhodou ale je velmi složitě řízení.

Druhou nevýhodou Goughovy plošiny je, že i když jsou pohony na sobě nezávislé, nemá jednoznačně oddělené translační a rotační pohyby. Pro každou pozici je nutno vypočítat a změnit polohu všech šesti členů. Tuto nevýhodu se snaží řešit robot Nabla 6

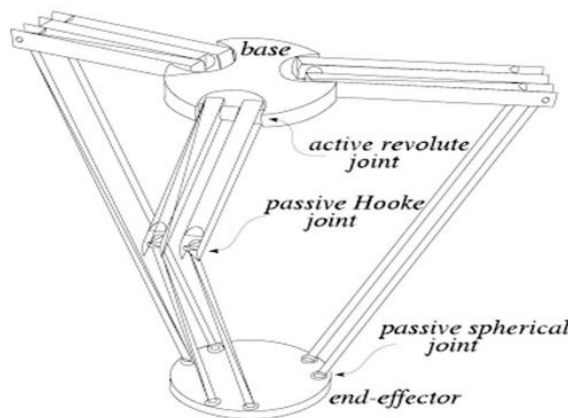


Obrázek 1-12: Nabla 6

Nabla 6 [6] je tvořena dvěma trojicemi ramen s možností pohybu po základně (podobně jako u dříve uvedeného robotu Star). Vnitřní trojice je k horní plošině připojena trojitým kulovým kloubem a jednoznačně určují polohu plošiny v prostoru, respektive obstarávají translační pohyb. Vnější trojice ramen je k horní desce připojena samostatně a obstarávají orientaci plošiny, respektive její rotační pohyby. Nevýhodou tohoto robotu ale je přítomnost trojitého kulového kloubu, jehož složitost už byla zmíněna dříve.

Na základě robotu Nabla 6 by bylo možné vytvořit i celou řadu odvozených typů, pouze s jinak rozmístěnými pohony nebo jinými typy kloubů. Složitost trojitého kulového kloubu a dostupnost počítačů schopných velmi rychle vypočítat kloubové proměnné u klasické Goughovy plošiny však tento typ robotu činí nepraktický.

Třetím velmi zajímavým typem paralelního robotu s 6DOF je robot Hexa (Obrázek 1-13) [7].



Obrázek 1-13: Robot Hexa

Už na první pohled je u tohoto typu robotu patrná příbuznost s dříve uvedeným robotem Delta. Hexa z něj přímo vychází a představuje rozšíření jeho konceptu pro všech šest stupňů volnosti. Je tvořen šesti samostatnými rameny párovaných po dvojicích a rozmístěných tak, jak je na obrázku. Všech šest ramen má vlastní pohon v horním kloubu. Co naopak proti Deltě chybí, jsou paralelogramy určené k udržení orientace koncové plošiny.

Hexa může pracovat ve dvou režimech. Tím jednodušším je čistě translační pohyb (3DOF). Při jeho realizaci jsou párovaná ramena natáčena do přesně stejného úhlu, jako by byla spojena. Dolní polovina ramen se přitom chová jako paralelogram Delty. V tomto režimu se co do chování ani řízení robot od Delta robotu nijak neliší.

Druhý režim je už včetně rotací, tedy plně 6DOF. Párovaná ramena, dříve vůči sobě nehybná se nyní vzájemně pohybují a plošina se tím naklání, přičemž velikost náklonu je úměrná rozdílu natočení horních ramen.

Výhodou tohoto robotu je vysoká pohyblivost při zachování většiny výhod Delty a zachování plně paralelní struktury. Nevýhodou ale je větší mechanická složitost a především složitější řízení. Protože výhody plně paralelní struktury se u nízkých zatížení zásadněji neprojeví a všech šest stupňů volnosti je jen zřídka u tohoto typu robotu zapotřebí, většinou řeší výrobci potřebu orientace pomocí sériového zápěstí. Nicméně Hexa zůstává i tak velmi cenným konceptem s dobrou možností uplatnění.

1.2 Pohony

Pohony pro robotiku obecně lze rozdělit podle několika kritérií. Podle způsobu přeměny energie nejčastěji na elektrické a na tekutinové. V daných rozměrech na trhu existuje nejvíce elektrických pohonů. Tekutinové pohony v této velikosti jsou spíše výjimkou a pravděpodobně by je bylo nutné řešit zakázkovou výrobou. Druhým kritériem rozdělení je podle druhu pohybu na pohony rotační a lineární. Podle tohoto kritéria budou pohony rozebrány a srovnány.

1.2.1 Rotační

V následujících odstavcích budou krátce popsány běžným a použitelným řešením. Více prostoru bude věnováno modelářským servům, protože ve strojírenské praxi nejsou zcela běžně používány. Naopak dobře známým typům pohonů je věnováno méně místa.

Naprosto nejběžnějším a nejdostupnějším pohonem jsou stejnosměrné komutátorové motory. Jejich výrobou se zabývá velké množství (převážně čínských) společností. Díky masové výrobě jsou velmi levné a s přijatelnou kvalitou. Běžně se prodávají s již namontovanou převodovkou, díky které by je z výkonového hlediska šlo do konstrukce jednoduše začlenit. Motory ale až na výjimky nemají integrovaný žádný systém zpětné vazby ani řídicí jednotku. Obecně jsou vhodné spíše pro spojitě otáčení než pro přesné polohování. Pro aplikaci v paralelním robotu, kde je přesné polohování klíčové, by to znamenalo poměrně dost práce na řídicím systému robotu.

Příkladem takového motoru je motor Pololu 37x57 s převodovkou 1:131 a s modulem enkodéru [8]. Celý tento blok je dodáván jako celek a je přímo určený pro aplikaci v rámci hobby robotiky. Integrace enkodéru už od výroby řeší část konstrukčních problémů. Maximální krouticí moment motoru je 1,76Nm, nominální otáčky jsou 80 ot/min při napětí 12V. Enkodér je kvadrurní se 64 pulzy na otáčku (8400 pulzů na otáčku výstupní hřídele). Hmotnost motoru je 230g. Výrobce prodává kola a unašeče kol robotů pro montáž přímo na osu robotu, nicméně nikde neudává povolené radiální zatížení výstupní hřídele.



Obrázek 1-14: Pololu 37x57

Alternativou obyčejných stejnosměrných motorů jsou modelářská serva [9]. Nejobyčejnější modelářská serva v podstatě nejsou nic jiného, než výše popsáný stejnosměrný motor doplněný o převodovku, potenciometr a řídicí obvod. Tedy vše co by bylo nutné k samotnému motoru doplnit. Přitom cena nemusí být výrazně vyšší, díky velkým objemům výroby. To z nich do určité míry dělá mnohem lákavější typ pohonu pro robot. Ovšem za cenu nulové přizpůsobitelnosti. Pokud některá část nebo vlastnost serva nevyhovuje potřebám, je velmi obtížné to nějak změnit, a pokud na trhu není vhodnější servo nutně povede ke kompromisům.

Prakticky všechny modelářská serva na trhu mají stejný způsob řízení. Servům se zadává výhradně žádaná poloha a to ve formě délky napěťového pulzu na vstupu. Pulz se standardně opakuje s frekvencí 50Hz, dnes už ale nejsou výjimkou ani serva schopné pracovat na vyšší frekvenci. Napěťový pulz je v úrovních 0/5V, přičemž k hodnotě napětí ale bývají serva často značně tolerantní (to je nutností, protože modelářské kontroléry měly v historii často špatnou kvalitu). Stejně jako je standardizován řídicí signál, existuje i standard v napájení modelářských serv. Naprostá většina serv je napájena napětím 4,8-6V stejnosměrných. Tyto napětí jsou odvozena od napětí NiCd/NiMH baterií (4/5članků). V poslední době se ale začínají rozšiřovat i serva na vyšší napětí, nejčastěji 7,4V. To je odvozeno od napětí LiPol akumulátorů (2članky), které se mezi modeláři začínají těšit velké oblibě.

Modelářská serva se podle typu řídicího systému dělí na analogová a digitální. Analogová mají analogový regulátor, zatímco v digitálních servech je zpravidla mikroprocesor. Z hlediska řízení se nijak neliší, ale digitální serva bývají obvykle přesnější a lépe drží polohu. Kromě toho je u některých typů možné do procesoru nastavit provozní parametry serva a tím měnit jeho chování.

Příkladem digitálního serva s programovatelnými parametry je servo Hyperion Atlas DH20-UTD HV [10]. Jedná se o nejsilnější servo v nabídce výrobce s maximálním krouticím momentem 2,4Nm (1,2Nm dynamicky) při rychlosti 60°/0,16s (ekvivalent 62,5ot/min), při napájecím napětí 7,4V. Rozsah natáčení je nastavitelný mezi 30-140°. Hmotnost serva je 59g. Dle výrobce je servo vybaveno dvěma kuličkovými ložisky bez bližší specifikace.



Obrázek 1-15: Hyperion Atlas DH20-UTD

Pokročilejší variantou modelářských serv jsou serva určená pro řízení počítačem. Typickým zástupcem jsou serva společnosti Dynamixel, určená kromě jiného pro robotiku. Mechanicky jsou tato serva téměř identická s modelářskými. Liší se ale napájením (12V) a řízením (po sériové lince). Díky vyššímu napětí a kvalitnějším dílům mají tyto serva i lepší provozní parametry. Vše je ale vykoupeno cenou, která je daná za malé výrobní objemy. Zatímco nejlevnější modelářská serva se pohybují v rámci stokorun s kvalitnějšími v tisícikorunách, serva Dynamixel se prodávají za téměř deset tisíc korun.

Konkrétním příkladem je servo Dynamixel RX-28 [11] s maximálním krouticím momentem 2,5Nm při napětí 14,8V a rychlosti 67ot/min. Jádrem serva je motor společnosti Maxon a servo je schopné komunikovat po rozhraní RS-485. Hmotnost serva je 72g.



Obrázek 1-16: Dynamixel MX/RX-28

Dalším typem použitelných pohonů jsou krokové motory. Ty jsou poměrně levné, běžně dostupné, jednoduše říditelné a i bez systému zpětné vazby dost přesné, zvláště v kombinaci s převodovkou. Do určité míry tím kombinují vlastnosti prostých stejnosměrných motorů a modelářských serv. Dokáží přesně polohovat, ale přitom umožňují přizpůsobit řízení aplikaci. Je ale nutné počítat s rizikem ztráty přesnosti pokud není použita zpětná vazba, a s o něco menším výběrem motorů na trhu.

Příkladem krokového motoru je motor SY35ST28 prodáváný společností Pololu [12]. Jde o hybridní krokový motor s 200 kroky na otáčku a přídržným momentem 0,1Nm při napětí 10V. Hmotnost motoru je 140g. Při použití převodovky s převodovým poměrem 1:20 by mohl být dosažen dynamický moment přibližně 1,6Nm při výstupní rychlosti otáčení 100ot/min.



Obrázek 1-17: SY35ST28

Poslední skupinou elektrických rotačních pohonů, které zde uvedeme, jsou kompletní servosystémy specializovaných firem. Jako příklad lze uvést například společnosti Maxon nebo Faulhaber. Obvykle se skládají ze stejnosměrných komutátorových nebo bezkomutátorových motorů, kombinovaných s převodovkou a systémem zpětné vazby. Řízení obstarává profesionální řídicí systém, schopný polohového řízení a komunikující s počítačem po sériové lince nebo počítačové síti. Z hlediska parametrů i snadnosti aplikace jde o naprosto bezkonkurenční řešení, ostatně proto jsou v profesionálních robotech (včetně katedrálních robotů) nasazovány. Jenže je zde vysoká daň v podobě ceny, která snadno může dosahovat desítek tisíc korun.

Co se týče tekutinových pohonů, ty lze dělit na hydraulické a pneumatické. V těchto velikostech je výběr velmi malý, nicméně vhodné pohony na trhu existují. Příkladem mohou být třeba mikrohydraulické motory HydroLeduc MH450DS [13] nebo motory Micro Hydraulics MM8 [14]. V obou případech jde o rozměrově relativně malé motory, s krouticím momentem okolo 1Nm. Velkým problémem ale může být přesnost, v důsledku netěsností ventilů i motorů. Částečným řešením by mohlo být použití převodovky. Tím zároveň stoupá krouticí moment na velmi vysoké hodnoty. V souvislosti s velikostí je i hmotnost. V případě motoru MH450DS je suchá hmotnost 700g. S ohledem na parametry to není vysoká hodnota, ale dokazuje, že jde o motor výkonnostně jiné třídy.



Obrázek 1-18: Hydro Leduc MH450DS

V porovnání s elektrickými motory jsou hydraulické při podobné velikosti mnohonásobně silnější. Paralelní robot s těmito pohony by tak mohl dosahovat vysoké nosnosti a výborného poměru hmotnosti k nosnosti. To by ale bylo vykoupeno nutností řešit hydraulické rozvody a mít hydraulické čerpadlo. Přesto by tento typ pohonů mohl být perspektivní.

Posledním typem jsou pneumatické rotační pohony. Na rozdíl od hydraulických motorů jsou pneumatické motory v této velikosti relativně běžně dostupné. Používají se běžně například v zubařských vrtačkách. Příkladem můžou být například motory společnosti All Air nebo Air-Oil Systems. Tyto motory jsou velmi malé a velmi lehké. Dodávají se v širokém rozsahu krouticích momentů a otáček, realizovaných integrovanou planetovou převodovkou. Konkrétním typem může být motor All Air Micro-Motors MMR-0004 [15] s krouticím momentem 2,26Nm, maximálních otáčkách 400 ot/min při 5bar a s hmotností 135g.



Obrázek 1-19: Micro Motors MMR-0004

Stejně jako hydraulické motory mají výborný poměr výkonu k hmotnosti. Navíc jsou schopné pracovat ve velkých rychlostech a samotné motory mají jen minimální setrvačnost, což je předurčuje pro vysokorychlostní aplikace (ideální pro vysokorychlostní paralelní motor). Problémem ale je přesné polohové řízení motorů, protože k tomuto nikdy nebyly určeny. Navíc v důsledku stlačitelnosti vzduchu se u nich dají očekávat problémy s tuhostí. Co by ale naopak mohlo být výhodou, jsou jednodušší rozvody (v porovnání s hydraulikou). V této konkrétní aplikaci by i mohl odpadnout kompresor, protože jako zdroj stlačeného vzduchu by mohla stačit tlaková nádoba, alespoň krátkodobě. Pro dlouhodobější použití by bylo možné použít přenosný kompresor.

1.2.2 Lineární

Lineární pohony jsou druhou velkou skupinou pohonů, vhodnou pro některé paralelní kinematické struktury. Zcela typická je například pro roboty typu Hexapod.

Prvním možným řešením jsou elektrické lineární aktuátory. Jsou zpravidla tvořeny elektrickým motorem a pohybovým kuličkovým šroubem. Typicky jsou definovány silou, rychlostí a zdvihem. Jako konkrétní příklad lze uvést elektrický aktuátor společnosti Firgelli, typ L12 [16] se zdvihem 10-100mm, silou 12-45N při rychlosti 23-5mm/s dle konfigurace.



Obrázek 1-20: Firgelli L12

Aktuátory mají podle provedení zabudovaný systém zpětné vazby a lze je řídit buď stejně jako modelářské servo (délkou pulzu), nebo napěťovým či proudovým vstupem (0-5V nebo 4-20mA). Zpětná vazba skutečné polohy je napěťová hodnota v rozsahu 0-3,3V.

Druhou zajímavou možností v oblasti elektrických lineárních pohonů je použití drátů s tvarovou pamětí. Jde o dráty ze speciálních slitin, které je možné ve studeném stavu plasticky natáhnout o několik procent. Pokud následně dojde k jejich zahřátí nad určitou teplotu (70-90° podle provedení), drát se vrátí na svou původní délku. Zdroj tepla může být buď externí, ale protože jsou dráty vodivé, stačí je připojit na zdroj napětí a k ohřevu dojde vlivem protékajícího proudu.

Dráty se vyrábějí v různých průřezech. Na průřezu je podle očekávání přímo závislá vyvinutá síla (maximální síla vychází z maximálního napětí v tahu). Zároveň ale je zapotřebí dodat pro zvýšení více tepla, respektive dráty musí procházet větší proud. Průřez teoreticky nemá žádný vliv na rychlost kontrakce drátu, ačkoliv vzhledem k velikosti proudů a bezpečnosti je zpomalení praktické. Naopak na rychlost opětovného roztahení má průřez značný vliv. K roztahení dochází působením vnější síly, ale až po ochlazení drátu pod kritickou hranici. Dráty se ochlazují vůči prostředí (vzduchu) a rychlost ochlazování je závislá na ploše povrchu drátu. Protože objem drátu roste rychleji než plocha, rychlost ochlazování drátu a tím jeho natažení s průřezem klesá. To je možné kompenzovat buď lepším chlazením, například nuceným ofukováním, nebo zvětšením plochy drátu, typicky použitím skupiny drátů místo jednoho silnějšího.

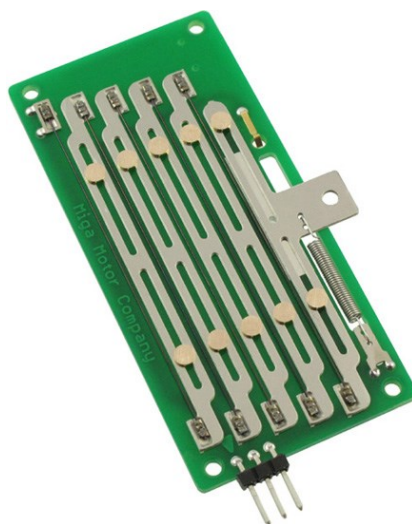
Hlavní výhodou drátů s tvarovou pamětí coby aktuátoru je extrémně malá velikost a hmotnost. Dále pak velmi jednoduchá kontrola, která sestává pouze z připojení a odpojení napětí. Logickou nevýhodou ale je, že drát má pouze dva extrémní stavy, zcela natažen a zcela stažen. Velikost deformace je přitom pouze několik procent, při zachování rozumné životnosti pod 5%. To značně komplikuje možnosti jeho použití. Nicméně při vhodné aplikaci, kde by vynikla jednoduchost a síla nad nevýhodami, by se mohl uplatnit. Příkladem použití by mohlo být ovládání efektoru nebo vysoce redundantní struktura podobná robotu Logabex (Obrázek 1-2).

Příkladem drátů s tvarovou pamětí jsou výrobky společnosti Dynalloy s obchodním označením Flexinol [17]. Pod tímto názvem se prodávají dráty ale i pásky. Dráty jsou o průměru 0,025 až 0,51mm. Drát o průměru 0,025mm má tažnou sílu cca 0,09N, zatímco drát o průměru 0,51mm už 36N. Metr 0,51mm drátu přitom váží jen asi 1,3g (aktuátor Fircelli s podobnými parametry 24N/50mm váží 40g). Cena jednoho metru drátu přitom je jen 10USD či méně.



Obrázek 1-21: Flexinol drát

Variací na stejné téma jsou aktuátory společnosti Miga Motor [18], které v podstatě nejsou nic jiného, než miniaturní mechanismus využívající drátů s tvarovou pamětí. Vlastnosti jsou stejné jako u samostatných drátů, pouze usnadňují jeho aplikaci a potřebnou délku aktuátoru. Nevýhodou proti samotnému drátu je pouze vyšší hmotnost a samozřejmě cena. Aktuátor MigaOne-15 působí silou 20N při zdvihu 8,2mm. Hmotnost aktuátoru je 12,8g



Obrázek 1-22: MigaMotor MigaOne-15

Lineární pohony jsou pravou doménou tekutinových pohonů. Obecně jsou nejtypičtějším zástupcem hydraulické a pneumatické válce. U hydraulických válců je ale stejně jako u rotačních motorů velký problém s velikostí. Nejmenší běžně dostupné hydraulické válce mají vnitřní průměr okolo 20mm, což při běžných provozních tlacích znamená síly 1kN a větší. To je pro použití na malém robotu silně předimenzovaná hodnota. Pro tyto válce by byl vhodnější podstatně větší typ robotu.

Příkladem hydraulického válce je válec společnosti SMC typu CHN [19] o vnitřním průměru 20mm. Síla na pístnici je mezi 235 a 2198 podle směru a velikosti pracovního tlaku. Nominální pracovní tlak je 7bar (2198/1645N) Hmotnost válce je 390g.



Obrázek 1-23: Válec SMC CHN

Trochu jiná situace je u pneumatických válců. Přestože i zde je obecně trend vyrábět větší průměry, jsou běžně dostupné i relativně malé válce. Příčinou bude určitě větší poptávka, ale možná také menší technické problémy vlivem nižších pracovních tlaků a menší závažnost úniků.

Příkladem pneumatického válce malého rozměru může být válec Bosch Rexroth ICM-8 [20], o vnitřním průměru 8mm. Síla při tlaku 6,3bar je 24/32N podle směru a maximální zdvih je 80mm. Váha válce se zdvihem 50mm je 40g. Parametricky tak téměř odpovídá elektrickým aktuátorům Firgelli L12.

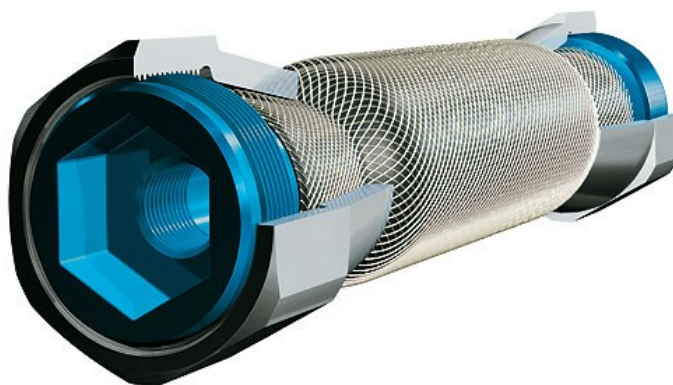


Obrázek 1-24: Válec Bosch Rexroth ICM

Jako u všech pneumatických válců je zde problém s polohováním. V základní podobě lze válec použít jen pro přesun mezi dvěma krajními polohami, podobně jako u Flexinol drátů. Dosáhnout žádanou polohu mezi těmito body pneumatickým válcem je možné, ale vyžaduje složitější mechanismus. Tím válec spojuje vlastnosti obou elektrických aktuátorů. Proti nim ale dokáže pracovat mnohem rychleji.

Poslední dosud nepopsaným běžně dostupným použitelným pohonem jsou pneumatické svaly. Jde nejčastěji o pružnou trubku či měch obklopenou vlákny či prstenci z neroztažného materiálu (konstrukcí je mnoho typů). Po přivedení tlaku do svalu (či naopak po přivedení vakua) dojde ke smrštění svalu a vyvinutí síly. Tím pneumatické svaly napodobují funkci skutečných svalů člověka a živočichů. Zároveň se funkcí velmi podobají drátům s tvarovou pamětí (o kterých se ve skutečnosti občas mluví jako o elektrických umělých svalech). Obecně ale s nimi sdílí nevýhodu ve špatné ovladatelnosti. Na rozdíl od nich ale nejsou závislé na změně teploty a prostředí nemá žádný vliv na jejich rychlost. Určitou nevýhodou ale je velikost. Protože pneumatické svaly dokáží vyvinout velkou sílu i při malém průměru, mají i nejmenší svaly o průměru 10mm sílu ve stovkách N, tedy stejně jako u hydraulických válců zbytečně vysokou hodnotu. Při použití pákového mechanismu tím ale je možné kompenzovat relativně malou změnu délky.

Příkladem pneumatického svalu je sval Festo DMSP-10 [22] o průměru 10mm, který při tlaku 10bar vyvine sílu až 630N. Možné délky jsou 40-9000mm, přičemž maximální povolené stažení je 25%. Pro srovnání hmotnosti s dříve uvedenými aktuátory, 200mm dlouhý sval (tj. se zdvihem 50mm) má hmotnost 84,8g. To je ze všech uvedených aktuátorů nejvíce, ale je třeba pamatovat na výrazně vyšší sílu. Relativně k vyvozené síle je sval velmi lehký.



Obrázek 1-25: Pneumatický sval Festo DMSP

2 Požadavkový list

Na základě rozboru problematiky a konzultace s vedoucím práce byly stanoveny tyto požadavky:

- Alespoň tři osy pohybu s čistě paralelní strukturou
- Délka jednoho ramene (kinematického řetězce) maximálně 0,5m
- Minimální velikost a tvar pracovního prostoru - válec 300x80mm
- Nosnost robotu přibližně 100g
- Celková hmotnost robotu do 10kg
- Robustní konstrukce a ochranné krytování pro minimalizaci rizika poškození při transportu
- Nízká cena

3 Varianty řešení

V této části práce budou krátce zmíněny uvažované varianty řešení a popis rozhodovacího procesu u dvou klíčových rozhodnutí návrhu. V průběhu další práce se objevovala řada dalších dílčích variant a rozhodnutí, ty však budou popsány v části věnující se jednotlivým komponentám robotu.

3.1 Kinematická struktura:

Prvním klíčovým bodem je rozhodnutí se pro konkrétní kinematickou strukturu robotu. Vybrané zajímavé struktury vhodné pro realizaci byly představeny již v rámci rešerše. Zde už proto budou zmíněny jen krátce a budou shrnuty jejich výhody a nevýhody.

Kinematická struktura Delta (Obrázek 1-6)

Delta je struktura se třemi translačními stupni volnosti a plošinou fixovanou proti rotacím. V současnosti jde o rychle se rozšiřující se typ robotu, nacházející se v nabídce téměř všech významných výrobců robotů. Vyznačuje se jednoduchou konstrukcí s rotačními pohony a nezávislostí všech pohonů. Jejím plusem je určitě výborné zdokumentování. Nevýhodou naopak použití kulových kloubů a poměrně velké požadavky na přesnost konstrukce.

Kinematická struktura Star (Obrázek 1-8)

Star částečně vychází z Deltý a sdílí nezávislost pohonů. Na rozdíl od Deltý paralelogramy nepoužívají kulové klouby, což zjednodušuje konstrukci. Konstrukce se ale spoléhá na pohybové šrouby, což může zvyšovat cenu a nároky na konstrukci.

Kinematická struktura Hexa (Obrázek 1-13)

Hexa je složitější variantou Deltý se šesti stupni volnosti. Díky jeho příbuznosti s Deltou je možné částečně využívat její dokumentaci. Přitom je ale robot podstatně univerzálnější a atraktivnější. Nevýhodou je ale vyšší složitost jak mechanismu, tak řídicího systému.

Vysoce redundantní paralelní struktura tvořená navrstvením kinematických struktur typu Hexapod (Obrázek 1-2)

Tato varianta je zdánlivě velmi složitá, ale protože se dá snadno rozložit na skupinu relativně jednoduchých a dobře zdokumentovaných hexapodů, její praktická složitost není výrazně vyšší než u jiných variant. Tato struktura by přitom mohla být zajímavá jak z vědeckého hlediska, tak z výukového, vzhledem k její značné atraktivnosti. Velmi zajímavá by tato struktura mohla být při použití velmi lehkých aktuátorů na principu drátů s tvarovou pamětí. Nevýhodou je ale nutnost řešit vzájemné propojení a kontrolu jednotlivých vrstev/modulů.

3.1.1 Rozhodovací proces:

Rozhodnutí bylo učiněno na základě praktických zkušeností a konzultací s vedoucím práce. Protože byla očekávána realizace robotu, byla snaha co nejvíce zjednodušit a urychlit počáteční návrhové práce na robotu, aby bylo co nejvíce času věnováno praktické aplikaci a zvládnutí možných problémů. Na situaci dále mělo vliv, že v té době byl uváděn na Centru robotiky katedry nový typ robotu ABB IRB-360, což je profesionální robot typu Delta. Pokud by navržený a realizovaný robot využíval stejnou kinematickou strukturu, mohl by v případě zdaru posloužit mimo jiné i pro výuku studentů.

Na základě těchto okolností byla vybrána kinematická struktura typu Delta

V případě ostatních struktur byl problém především ve větší složitosti mechanismů, které by si vyžádaly více času v návrhové fázi. Protože navíc pro tyto struktury není k dispozici tolik podkladů, hrozilo, že by se při realizaci narazilo na obtížně řešitelný problém, který by způsobil další zbytečné odklady.

3.2 Pohonné jednotky

Pohonné jednotky představují druhý klíčový bod návrhu. Zvolený typ pohonu může značně ovlivnit konkrétní provedení i složitost výsledného robotu. Proto je důležité učinit toto rozhodnutí již v úvodní fázi návrhu.

Klasická kinematická struktura typu Delta využívá tři rotačních pohonů pro pohyb ramen a případně jeden nebo více pohonů pro pohon dodatečných os a efektoru. Z toho důvodu budou uvedeny především rotační jednotky. Struktura ale umožňuje i přizpůsobení pro lineární pohony, proto bude popsán i jeden z nich.

Pohon stejnosměrnými motory (Obrázek 1-14)

Z hlediska volnosti konstrukce i přizpůsobitelnosti jedno z nejlepších řešení. Samotný motor by musel být doplněn o převodovku a enkodér a musel by být vytvořen a naprogramován řídicí systém. Kvůli malé únosnosti ložisek by navíc zřejmě muselo být řešeno uložení ramen do ložisek. Díky nejlepší možnosti přizpůsobení by robot pravděpodobně dodával nejlepší výsledky. Její realizace by ale vyžadovala jednoznačně největší množství práce.

Použití digitálních modelářských serv (Obrázek 1-15)

Modelářská serva by z hlediska pracnosti naopak představovala nejjednodušší variantu, v ideálním případě by přitom podávala téměř identické výsledky. Z hlediska uložení ramen, pokud by ložiska v servech prokázala dostatečnou únosnost, nebylo by ani nutné uložení dále řešit. Bohužel ale k modelářským servům nejsou dostupné všechny potřebné informace, a tak by některé provozní vlastnosti bylo zapotřebí vyzkoušet.

Modifikace modelářských serv

Tato varianta představuje v podstatě kombinaci předchozích dvou. Použila by se mechanická část modelářského serva, ale zcela by se nahradila řídicí elektronikou vlastním řídicím systémem. Tím by se ušetřila velká část práce, ale přitom by bylo možné více zasahovat do řízení robotu. Kromě toho jde na tuto variantu přejít z předchozí varianty, pokud by se v ní objevily neřešitelné problémy.

Použití počítačových serv Dynamixel (Obrázek 1-16)

U serv Dynamixel se dá očekávat, že budou vyhovovat jak po mechanické stránce, tak umožní snadné řízení pomocí sériové linky. Bohužel to je ale vykoupeno velmi vysokou cenou a špatnou dostupností v České republice. Jedno servo Dynamixel stojí téměř desetinásobek kvalitního modelářského serva a ještě více v porovnání se stejnosměrným motorem s převodovkou.

Pohon lineární aktuatory Firgelli (Obrázek 1-20)

Lineární aktuatory by si vyžádaly úpravu kinematické struktury, ovšem na druhou stranu by při vhodném způsobu připojení mohl být upraven silový profil tak, aby robot byl schopen pracovat s vyšším zatížením. Řízením jsou velmi podobné rotačním servům.

3.2.1 Rozhodovací proces:

Při rozhodnutí o pohonu byla snaha stejně jako u kinematických struktur k co nejrychlejšímu postupu od návrhu po realizaci. Proto bylo odstoupeno od varianty použít stejnosměrné motory, a to i přesto, že se z provozního hlediska zřejmě jedná o nejlepší řešení.

Varianta se servy Dynamixel byla z cenových důvodů odložena jako záložní řešení. Jejich použití by sice značně zrychlilo vývoj robotu, ale zároveň by několikanásobně zvýšil jeho cenu.

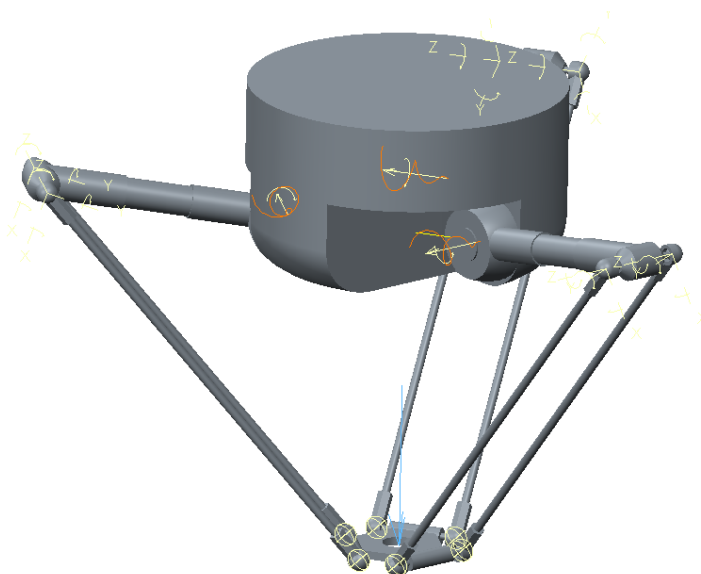
Z praktických důvodů se odstoupilo i od myšlenky použít lineární aktuatory. Jejich aplikace by zvýšila složitost konstrukce a přitom by se nemusely projevit výhody proti rotačním pohonům.

Jako konečná varianta tak bylo vybráno použití modelářských serv. Celá řada parametrů (zejména těch souvisejících s řízením) ale byla neznámá. Proto bylo rozhodnuto zakoupit jeden kus modelářského serva a podrobit ho testům. V případě dobrých výsledků by serva mohla být použita v tovární podobě. Pokud by serva vyhovovala mechanicky, ale byl problém v jejich řízení, bylo by přistoupeno k třetí variantě, nahrazení jejich řídicího systému. Pouze v případě, že by praktické parametry byly zcela nevyhovující, by byla tato varianta opuštěna a hledalo by se jiné řešení.

3.3 Praktický test modelářského serva

3.3.1 Předběžný výpočet

Ještě před nákupem serva pro test bylo nutné určit potřebné momenty a tak určit vhodnou velikost. Pro přibližný výpočet byl vytvořen zjednodušený model robotu v programu Creo (bližší popis modelu je v další části práce). Přestože v této chvíli šlo o dost hrubý model, hlavní rozměry i hmotnosti pohybujících se částí již přibližně odpovídaly budoucímu robotu. Proto se daly očekávat výsledky přibližně odpovídající skutečnosti.



Obrázek 3-1: Předběžný výpočtový model robotu

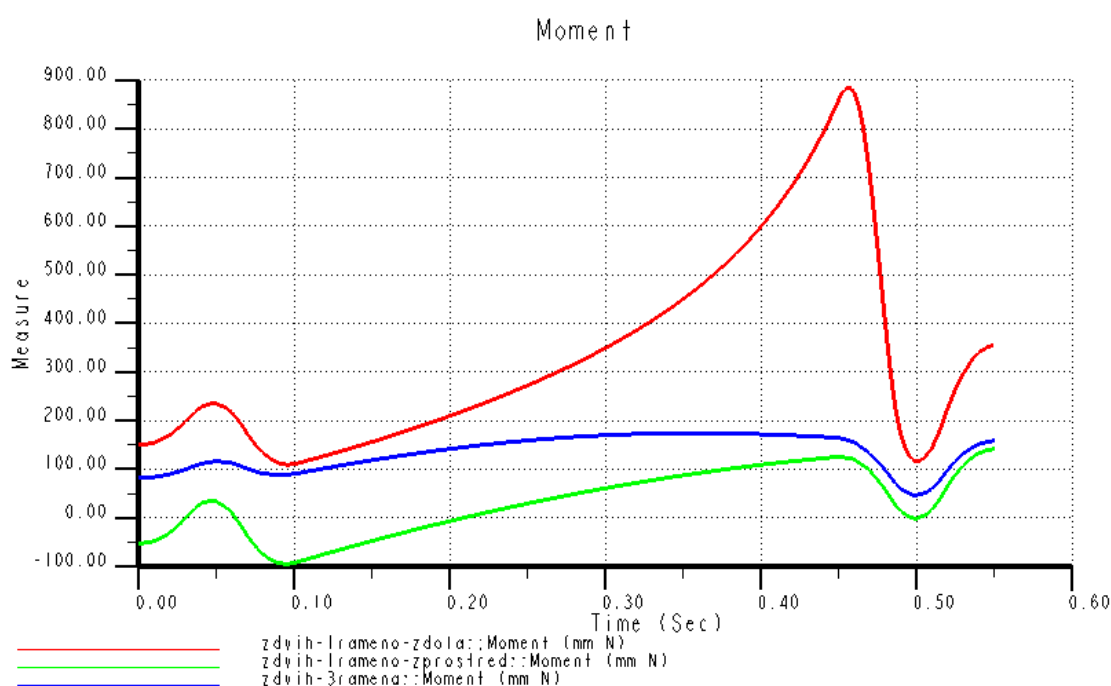
Pro výpočet momentů byl použit modul Mechanism. V něm byla nadefinována gravitace, pohony všech tří os a přídavná síla o velikosti 1N, působící na střed spodní plošiny ve směru gravitace. Síla simuluje objekt manipulace s hmotností okolo 100g.

Byly nadefinovány tři dynamické analýzy, představující pohyby v pracovním prostoru. V této fázi návrhu byl ještě jako pracovní prostor robotu uvažován celý objem dosažitelný koncovým bodem robotu při určitém rozsahu pohybu ramen. Později byl praktický pracovní prostor z různých důvodů omezen. Analýzy v celém objemu přesto mají nezanedbatelnou vypovídací hodnotu, protože je možné je považovat za extrémy.

Prvním analyzovaným pohybem bylo svislé zvedání z nejnižší do nejvyšší polohy. Horní ramena byla spuštěna do nejnižší polohy (-80°) a byla jim nastavena maximální rychlost $180^\circ/\text{s}$. Rozběh a brždění serva bylo nastaveno tak, aby plné rychlosti/zastavení dosáhly za 0.1s. Při této rychlosti by se již měly výrazně na zatížení projevit dynamické účinky. Plný rozsah natočení ramen (90°) robot při tomto nastavení překoná za přibližně 0,6s.

Další dvě analýzy jsou šikmý pohyb po kraji pracovního prostoru. V obou případech je poháněno jen jedno rameno a další dvě jsou zabržděna. Při jednom pohybu jsou dvě ramena zastavena ve spodní poloze, při druhém v horní. Pohyb s pouze jedním poháněným ramenem byl zvolen, protože se u něj očekává největší zatížení.

Produktem analýz jsou grafy zatížení



Obrázek 3-2: Momentové křivky

Modrá čára představuje momentové zatížení při zdvihu všech tří ramen, červená při zdvihu jednoho ramene ze spodní polohy a zelená zdvih jednoho ramene ze střední polohy. Všechny hodnoty jsou uvedené v mNm.

Z grafů je vidět, že zatímco při svislém zdvihu jsou momenty relativně nízké a maximum dosahuje hodnoty 174mNm, při zdvihu jedním ramenem z dolní polohy moment rychle stoupá a zastavuje

se na hodnotě 885mNm, přičemž příčinou poklesu je až začátek zpomalování ramene. To je způsobeno velkým posunem pracovního bodu proti ose robotu a zároveň narovnáváním spodních částí stojících ramen do vodorovné polohy, čímž tyto přestávají nést statickou tíhu plošiny.

Křivka zatížení třetího pohybu není z hlediska velikostí momentů nijak zajímavá. Nicméně je zajímavá tím, že přechází ze záporných do kladných hodnot. To je dané polohou mechanismu, kdy nejprve rameno tlačí koncový bod do strany a poté jej začíná zvedat.

Za největší zatížení pro které bude dimenzováno servo je nutné považovat hodnotu 885mNm.

3.3.2 Výběr a bližší popis modelářského serva

Na základě výsledků analýz bylo vybráno servo Hyperion Atlas DH20-UTD HV. Důvodem pro koupi právě tohoto typu serva jsou jeho dobré katalogové parametry, relativně nízká cena a možnost nastavení parametrů z počítače.

Servo Atlas DH20-UTD HV je největším a nejsilnějším servem z aktuální řady výrobce a zároveň patří k jeho nejnovějším modelům. Má udávány tyto parametry:

	HP-DH20-UTD
Typ serva	Plně programovatelné servo na vysoké napájecí napětí
Rozměry mm	40.0 x 19.5 x 39.8
Hmotnost gram	59.5
Rychlost (sec/60 deg @ 6.0/7.4V)	0.19/0.16
Dynamický moment (kg/cm @ 6.0/7.4V)	10.5/12.0
Přídržný moment (kg/cm @ 6.0/7.4V)	21.0/24.0
Materiál hlavního převodu	titan
Ložiska	Dvě kuličková
Programovatelnost	Ano
Úhel rotace	Nastavitelný od 30 do 140 stupňů, výrobní nast. 90 st.
Rozsah nastavení rychlosti	Ano, 1% až 100% normální rychlosti (výr. nastavení 100%)
Max. vstupní napětí	V žádném případě (se zátěží, bez zátěže) nesmí překročit 8.4V

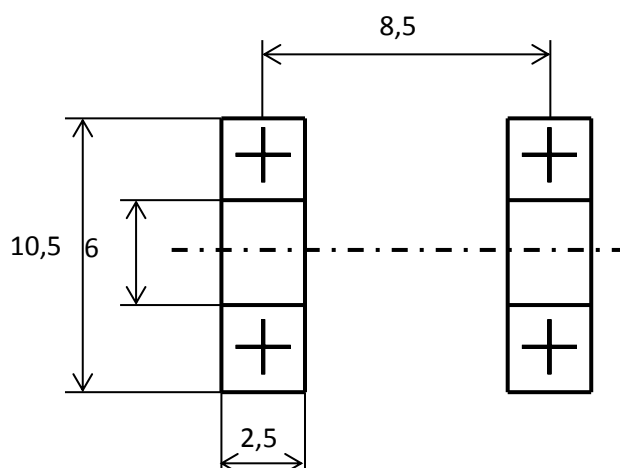
Tabulka 1: Parametry serva

Základem serva je mikrokontrolér typu PIC, který porovnává žádanou a skutečnou hodnotu a na základě jejich odchylky řídí motor. Důležité je, že proces je prováděn digitálně. Tím se servo liší od klasických analogových serv, kde tutéž funkci zastává analogový obvod. Díky digitálního řízení je možné dosáhnout mnohem vyšší přesnosti a kratších reakčních časů při srovnatelné ceně.



Obrázek 3-3: Motor a mikrokontrolér

Další částí serva je motor, podle všeho konvenční komutátorový. Motor přes pastorek přímo roztáčí ozubená kola převodů. Převodovka je čtyřstupňová s přibližným převodovým poměrem 245:1. Pastorek motoru je mosazný, první kolo je plastové, další dvě vložené titanové a poslední pravděpodobně ocelové. Všechny kola s výjimkou posledního jsou osazeny kluzně na pevných osách, poslední kolo které je zároveň osou unašeče je ve dvou kuličkových ložiscích. Přibližné rozměry ložisek jsou zde:



Obrázek 3-4: Rozměry ložisek

Přesné parametry ložisek jsou neznámé, ale na základě jejich velikosti je možné parametry odhadnout, respektive převzít katalogové údaje ložisek podobné velikosti. Z parametrů je následně možné vypočítat jejich únosnost, respektive dovolené radiální zatížení a klopný moment na unašeč serva.

Poslední nezmíněnou integrální součástí serva je potenciometr, připojený na osu posledního kola/unášče. Slouží pro zpětnou vazbu řídicího systému ale bohužel řídicí systém tuto informaci ven ze serva neposílá. Protože je ale potenciometr ve zcela standardním zapojení, mělo by být v případě potřeby vyvést signálový kabel ven. Pouze by bylo nutné ověřit, jestli impedance AD převodníku příliš neovlivní přesnost serva.

Na druhé straně hřídele unašeče, již venku, je samotný unašeč. Unašečů je v balení několik velikostí i tvarů podle aplikace. Všechny unašeče ale jsou plastové a k ose jsou uchyceny pomocí těsnicího šroubu s axiálním zajištěním jedním šroubem M3

Ze serva vedou standardní 3 vodiče. Černý a červený pro napájení (6-8V) a bílý pro řídicí signál. Bílý vodič je ale zároveň používán pro sériovou komunikaci s počítačem za účelem programování parametrů.

3.3.3 Kontrolní výpočet ložisek

Pro výpočet převezmeme parametry z ložiska obdobné velikosti. Takovým ložiskem je ložisko s označením DDL-1060 od společnosti NMB [23]. Jeho katalogové parametry jsou uvedeny v tabulce:

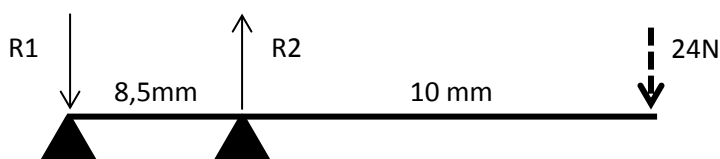
Vnitřní průměr	6 mm
Vnější průměr	10 mm
Šířka	2,5 mm
Počet kuliček	9
Průměr kuliček	1,191 mm
Statická únosnost	194 N
Dynamická únosnost	457 N

Tabulka 2: Parametry ložiska

Ložisko použité v servu se liší pouze počtem kuliček. Místo 9 jich má 10. Větší počet kuliček by ale měl mít na únosnost spíše pozitivní vliv, proto tento rozdíl můžeme zanedbat.

Ložiska budou kontrolována na dynamickou únosnost dle [24]. Nejprve zjistíme velikost radiální síly působící na osu serva. K tomu použijeme dříve použitý model a analýzy. Z výsledků vychází provozní síly kolísající mezi 6 až 12 N podle polohy ramen, přičemž největší síly se dosahuje při jedné z rozběhových špiček a dosahuje velikosti přibližně 24 N. Hodnoty celkem odpovídají očekávání, protože ramena se spodní plošinou a objektem manipulace váží okolo 1kg a mění se pouze poměr s jakým hmotnost nesou jednotlivá serva.

Pro další výpočet použijeme hodnotu radiálního zatížení 24N. Protože síla působí na unašeč a ne v ose ložisek, vyvolává klopný moment. Proto je zapotřebí nejprve sílu přepočítat na reakce v ložiscích.



Obrázek 3-5: Rozložení sil

K tomu použijeme podmínku statické rovnováhy. Mezi osami obou ložisek je vzdálenost 8,5mm, vzdálenost od osy ložiska k rovině unašeče je přibližně 10mm. Z podmínky momentové rovnováhy vychází síla R2:

$$R2 = 24 * \frac{18,5}{8,5} = 52,2N \quad (3.1)$$

Ze silové rovnováhy vychází síla R1:

$$R1 = R2 - 24 = 28,2N \quad (3.2)$$

Největší vypočtené radiální zatížení na ložisku je tedy 52,2N na ložisku nejbliž unašeče.

Při známém zatížení je možné dopočítat trvanlivost ložiska:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{R2}\right)^3 * 10^6 = \left(\frac{457}{52,2}\right)^3 * 10^6 = 671 * 10^6 \quad (3.3)$$

Vypočtená hodnota symbolizuje počet otáček, po kterých se s 10% pravděpodobností bude projevovat únavové poškození. Výsledná hodnota je extrémně vysoká a značí, že jsou ložiska pro tuto aplikaci silně předimenzované. K podobnému výsledku bychom se dostali i v případě kontroly statické únosnosti (což je patrné z porovnání skutečného zatížení a statické únosnosti). Předimenzování v praxi znamená, že i když se skutečná únosnost ložisek může od odhadované lišit, je možné předpokládat, že jsou ložiska plně vyhovující.

3.3.4 Provozní test

Protože oficiální parametry nejsou dostatečné a nepodařilo se najít žádné spolehlivé zdroje s provozními zkušenostmi, bylo přistoupeno k provoznímu testu. Nejvíce bylo potřebné zjistit, jak je na tom servo s přesností a tuhostí polohování, společně se stabilitou držení této pozice. Byly dostupné zkušenosti s analogovými servy, které většinou disponovaly špatnou přesností, tuhostí i stabilitou, což způsobovalo nepříjemné kmitání serv při zátěži. Analogové serva totiž nedokáží reagovat na odchylku od žádané hodnoty dostatečně rychle, což způsobuje, že reakční zásahy jsou zbytečně velké. Je nutné provést test, zda toto digitální serva díky své rychlosti řeší.

První fáze testu proběhla na servu připojeném k počítači přes programovací adaptér a dodaný software Hyperion ServoCommand. Software umožňuje zaslat servu žádanou polohu přímo po sériové lince, čehož bylo využito. Byly mu opakovaně posílány polohy a sledována jeho reakce. Servo se vždy natočilo do žádané polohy bez znatelných překmitů. Servo bez problémů reagovalo i na změny polohy o 1°(nejmenší rozdíl který je schopný program odeslat). Poté byla zkoušena tuhost. Servu byla nastavena cílová poloha a po jeho ustavení byl aplikován moment na unašeč ve snaze jej z této polohy vychýlit. Řídicí systém serva se zachoval příkladně, když s reakčním zásahem přišel ještě než došlo k natočení unašeče o znatelný úhel. Tím byla ukončena první fáze testu s výbornými výsledky.

Druhá fáze testu bylo připojení serva k regulárnímu zdroji řídicího signálu (tedy s klasickým řídicím signálem pro serva). Servo bylo připojeno k mikrokontroléru Atmel, naprogramovaném tak, aby vysílal řídicí signály podle polohy připojeného potenciometru. Přestože přesnost a tuhost serva byla stále výborná, bohužel se již začala projevovat nestabilita. Servo v některých polohách místo aby drželo jednou nastavenou polohu, mělo snahu pomocí reakčních zásahů se pohybovat v jejím těsném okolí. Vzhledem k přesnosti serva to na unašeči nezpůsobovalo výraznější pohyb, ale přesto to znamená vyšší spotřebu energie, vibrace od záškubů motoru a větší mechanické opotřebení serva, jevy kterým se chceme pokud možno vyhnout.

Protože se toto chování projevovalo i po odpojení potenciometru od mikrokontroléru, je možné za příčinu označit nepřesnost řídicího signálu, případně jeho samotnou archaickou strukturu. Řídicí signál je tvořen pulzy o délce 1-2ms přičemž řídicí veličinou je jeho délka. Toto částečně analogové řízení je ale náchylné na chyby jak od rušení, tak od nepřesnosti DA a AD převodníků (v

tomto případě vlastně časovačů), umocněné přesností serva, které je schopné i na drobné odchylky signálu reagovat.

Teoreticky je možné zkusit problém vyřešit eliminací rušení a/nebo zpřesněním řídicího signálu z mikrokontroléru. To by ale vyžadovalo buď dražší a složitější univerzální systém, nebo naopak jednodušší, ale jednoúčelový obvod. Druhou variantou (doporučovanou výrobcem) je zvětšit v nastavení serva pásmo necitlivosti. Standardní hodnota jsou 2us a je možné ji zvýšit až na 16us. Větší pásmo necitlivosti ale znamená horší přesnost i tuhost. Alternativou k řízení délkou pulzu je sériový komunikační protokol, který byl analyzován a popsán v rámci této práce. Ten ale přináší vlastní sadu problémů.

Výsledkem testu tedy je, že digitální servo plně splňuje požadavky na něj kladené. Bohužel ale je nutné použít buď kvalitnější zdroj řídicího signálu, nebo obětovat část přesnosti a tuhosti.

3.3.5 Analýza komunikačního protokolu

Jedna z klíčových vlastností zvoleného serva je možnost programování parametrů z počítače s využitím programu Hyperion ServoCommand a USB programátoru Hyperion HP-AT-PRGUSB. Účelem je pouze nastavení řídicích parametrů, jako je třeba maximální velikost výchylky nebo rychlost, nicméně pro testovací účely je možné přes toto rozhraní i servo ovládat. Právě tato vlastnost je velmi zajímavá a vedla k myšlence popsat komunikační protokol a používat jej pro řízení serv, podobně jako jsou řízena mnohem dražší serva Dynamixel.

Ohledně komunikace mezi servem a počítačem existuje jen minimální množství dokumentace. Existuje návod k ovládacímu programu [25], který prozrazuje, že je možné poslat servu žádanou polohu. Dále existuje provozní a instalační návod k programátoru [26], který uvádí, že je založený na čipu Silicon Labs CP2102, což je převodník z USB na UART rozhraní [27]. Návod dále odkazuje na ovladače přímo na stránkách Silicon Labs, což naznačuje, že je rozhraní implementováno standardně. Toto nepřímo potvrzovalo i několik příspěvků na různých internetových fórech, přestože samostatně by nebyly považovány za spolehlivé zdroje.

Toto byly informace dostupné ještě před nákupem serva a programátoru. Nezaručovaly, že sériová komunikace bude možná, ale minimálně poukazovaly, že by to mohlo být možné. To se stalo i jedním z argumentů pro nákup právě zvoleného serva. Kvůli nejistotě neměl takovou váhu, aby vyvážil nevyhovující parametry, ale upřednostnil toto servo před jinými se stejnými parametry.

Po fyzickém doručení serva a programátoru byly provedeny dříve uvedené testy a poté již mohlo být přistoupeno k dalšímu rozboru možností řízení. Jako první byla zaměřena pozornost na programátor. Ten se kromě několika pasivních součástek skládá opravdu pouze z čipu CP2102. Také v počítači se hlásí pouze jako CP2102. Nikde na programátoru ani v počítači se neobjevuje jméno výrobce serva, Hyperion, které by naznačovalo, že by proces programování byl nějak HW podmíněn. Z hlediska operačního systému i programu ServoCommand je programátor pouze virtuálním COM portem. To znamená, že Hyperion se nesnažil programování nijak komplikovat, což je pro naše účely důležité.

Pro další práci je ještě nutné si na programátoru povšimnout, že má pouze tři výstupní piny, přičemž dva z nich jsou napájení. To se shoduje s kabelem serva které má rovněž jen tři vodiče. To ale znamená, že není přítomná klasická Tx a Rx linka. Z praktického hlediska to může znamenat dvě možnosti. První je, že je přítomná jen Tx linka, což znamená, že počítač může pouze vysílat a

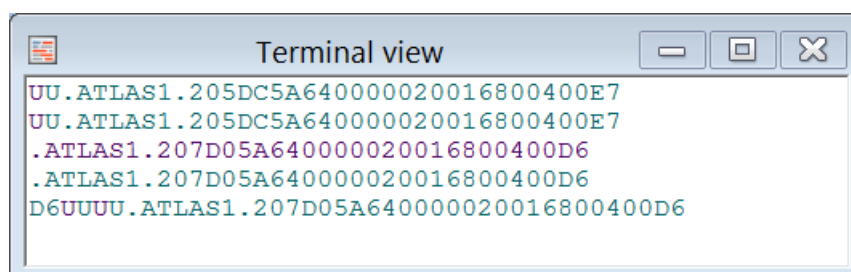
servo pouze přijímat. Pro účely programování serva jednosměrná komunikace dostačuje, nebyla by ale dostupná žádná zpětná vazba. Ta by byla přítomná při druhé variantě, kterou je vzájemné spojení Tx a Rx do smyčky a následný přenos jedním vodičem. Tím by byla možná half duplex komunikace v obou směrech po jednom vodiči. Úskalím je, že jakákoliv odeslaná zpráva se okamžitě vrací a míchá se mezi regulérní přijaté zprávy. Bylo by tak nutné přijaté zprávy třídit, což ale samozřejmě není zásadní problém.

O tom, která varianta je použita vypovídá označení na programátoru, kdy je datový pin označen z jedné strany jako TRX a z druhé Tx/Rx. Jednoznačné potvrzení zapojení do smyčky pak je přímo v programu ServoCommand. Pokud by byla komunikace pouze jednosměrná, bylo by možné program odkázat na libovolný z COM portů v počítači bez ohledu na to, jestli na něm servo je nebo není přítomné. ServoCommand ale pro funkčnost vyžaduje odpověď a načtení dat ze serva, tedy musí existovat obousměrná linka. Na přítomnost smyčky je nutné pamatovat, projeví se při analýze dat.

Z pochopení jednotlivých komponent je možné sestavit model celého systému a jeho funkce. V počítači je spuštěna aplikace ServoCommand, která převezme informace od uživatele a vytvoří z nich data, zakódovaná v určitém formátu. Tyto data aplikace odesílá na COM port (předem vybraný) operačního systému, který je už na nižší úrovni znovu překládá a odesílá po USB lince do programátoru. Ten data přijme, do třetice přeloží a odešle po UART lince do serva. Servo data přijme, zpracuje a odešle odpověď. Ta pak putuje zpátky stejným způsobem až do programu ServoCommand.

Pro přesné pochopení systému ale potřebujeme znát formát a obsah posílaných dat. Potřebujeme je zachytit. Existuje více způsobů jak to udělat, ale pro nás nejjednodušší je odposlech COM portů přímo v počítači. K tomuto účelu byl použit program Serial Port Monitor 4.0 společnosti Eltima Software. Jde o komerční software, ale jeho licence umožňuje bezplatné užívání po dobu 14 dní bez omezení na způsob užití.

Postup zachycení dat byl následující: Servo bylo přes programátor připojeno k počítači. Ještě před spuštěním ServoCommand programu byl spuštěn program Serial Port Monitor a bylo mu nastaveno monitorování COM portu se servem. Teprve poté byl spuštěn program ServoCommand. Program ServoCommand se následně připojil k servu a načel z něj informace. Poté bylo do programu vloženo žádané nastavení serva a spuštěno nahrání nastavení do serva. Tím byly nahrány všechny typické způsoby komunikace. Záznam v programu Serial Port Monitor, v režimu Terminal (tzn. data v ascii formátu) je zde:



Obrázek 3-6: Terminálové okno

Fialový text je Tx, modrozelený Rx. Už na první pohled je vidět, že je komunikační protokol velmi jednoduchý a především, že není

nijak kódovaný. Tahle skutečnost velmi usnadnila pochopení komunikačního protokolu a jeho využití.

Ale postupně jak probíhala komunikace. Hned na začátku zaslal ServoCommand jediný ASCII znak „U“. Jako odpověď dostal okamžitě poté stejný znak „U“ a těsně poté dlouhý řetězec `.ATLAS1.205DC5A640000020016800400E7` následovaný znakem konce řádku. Poté se celý postup opakoval. Tím byla ukončena inicializace a připojení programu ServoCommand k servu. Následuje zaslání nové polohy programem ServoCommand. To je realizováno odesláním stejného řetězce, který zaslalo servo, pouze s pozměněnými hodnotami, opět následovaný koncem řádku. Odpovědí je ihned totéž a krátce poté poslední dva viditelné znaky, už bez konce řádku. Poté následuje automaticky inicializační posloupnost jako na úplném začátku, pouze tentokrát je dlouhý řetězec odpovědi až na druhé volání.

Komunikace se dále zjednoduší, pokud si uvědomíme, že jsou Tx a Rx ve smyčce, z čehož plyne, že jakákoliv odeslaná zpráva se hned odrazem vrací. Pokud ze záznamu odstraníme odražené zprávy, vypadá záznam takto:

```
->      U
<-      [0C]ATLAS1.205DC5A640000020016800400E7[0D]
->      U
<-      [0C]ATLAS1.205DC5A640000020016800400E7[0D]

->      [0C]ATLAS1.207D05A640000020016800400D6[0D]
<-      D6
->      U
->      U
<-      [0C]ATLAS1.207D05A640000020016800400D6[0D]
```

Tentokrát je text zobrazen včetně netisknutelných ASCII znaků. Komunikaci začíná počítač znakem U ([55]). Je-li komunikace v pořádku, posílá servo zpět řetězec celkem 36 znaků, uvozených i ukončených neviditelným znakem. Bez ohledu na výsledek je celý postup ještě jednou opakován.

Znak U, kterým komunikace začíná, má svůj význam. Přestože pro počítač jde o ASCII znak U, pro servo podle všeho o ASCII znak nejde. U je binárně kódováno jako 0101 0101. Pokud vezmeme v úvahu vlastnosti UART linky, tedy že výchozí stav je HIGH, Start bit LOW, Stop bit HIGH a data jsou přenášena ve schématu LSB first, vypadá signál na datové lince takto: ----_ _ _ _ _---- (0 1010 1010 1). Servo tak podle všeho nereaguje na znak U ale na pravidelnou sérii změn. Skutečnou sériovou komunikací je až odeslání řetězce.

Programování hodnoty začíná počítač zasláním strukturně shodného 36 znakového řetězce jako obdržel, včetně netisknutelných znaků. Servo po přijetí posílá zpět poslední dva viditelné znaky jako oznámení přijetí zprávy. Ve skutečnosti jsou poslední dva viditelné bity kontrolním součtem, takže si počítač může zkontrolovat integritu odeslané zprávy. Po odpovědi serva začíná ServoCommand znovu inicializaci dvojitým zasláním znaku „U“. Je dobré si všimnout, že v tomto případě servo odpovědělo až na podruhé. Je vyzorováno, že po naprogramování hodnot servo nikdy neodpovídá na první pokus. Důvod je neznámý, pravděpodobně to ale souvisí s eliminací možných chyb vlivem odrazu zprávy. Vysvětluje to ale proč ServoCommand zasílá vždy dva dotazy, až teprve druhá chybějící odpověď značí chybu.

Správné pochopení principu komunikace zatím bez porozumění významu řetězce je možné otestovat přímým zasláním znaků a řetězce na COM port, jako by to udělal ServoCommand. K tomu je ale nutné znát správné nastavení COM portu (virtuálního RS232). Správné nastavení je uloženo v programu ServoCommand i přímo v servu, opět ale není možné je přímo zjistit. Protože ale ServoCommand musí toto nastavení předat operačnímu systému je opět možné je odposlechnout. Pouze je nutné se zaměřit na nižší úroveň.

Zobrazíme v Serial Port Monitoru tutéž komunikaci, ale tentokrát v režimu Table. V tomto režimu pohledu se zobrazuje veškerá komunikace, včetně běžně neviditelných systémových low-level příkazů. Nás zajímá pouze řádek udávající rychlost (Baud rate)

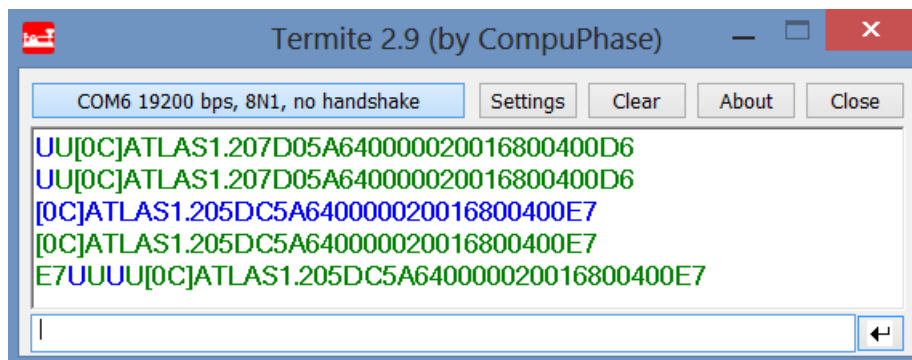
26	18:36:01:711	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_SET_BAUD_RATE)	DOWN	00 4b 00 00
27	18:36:01:715	IRP_MJ_DEVICE_CONTROL (IOCTL_SERIAL_SET_BAUD_RATE)	UP	

Obrázek 3-7: Rychlost komunikace

V odposlechnuté komunikaci systém nastavil hodnotu proměnné na 00 4b 00 00. Pokud vezmeme v úvahu, že je hodnota uváděna ve formátu LSB first a přepočteme ji na decimální číslo, dostaneme hodnotu 19200 bps. Tento parametr je nejzásadnější, zbylé parametry je možné odhadnout na základě typického nastavení.

Pro zaslání dat do COM portu použijeme program Termite. Nejprve provedeme nastavení. Nastavíme správný COM port, Baud rate 19200, Data bits 8, Stop bits 1 a zbytek none. Jde o typické nastavení COM portu.

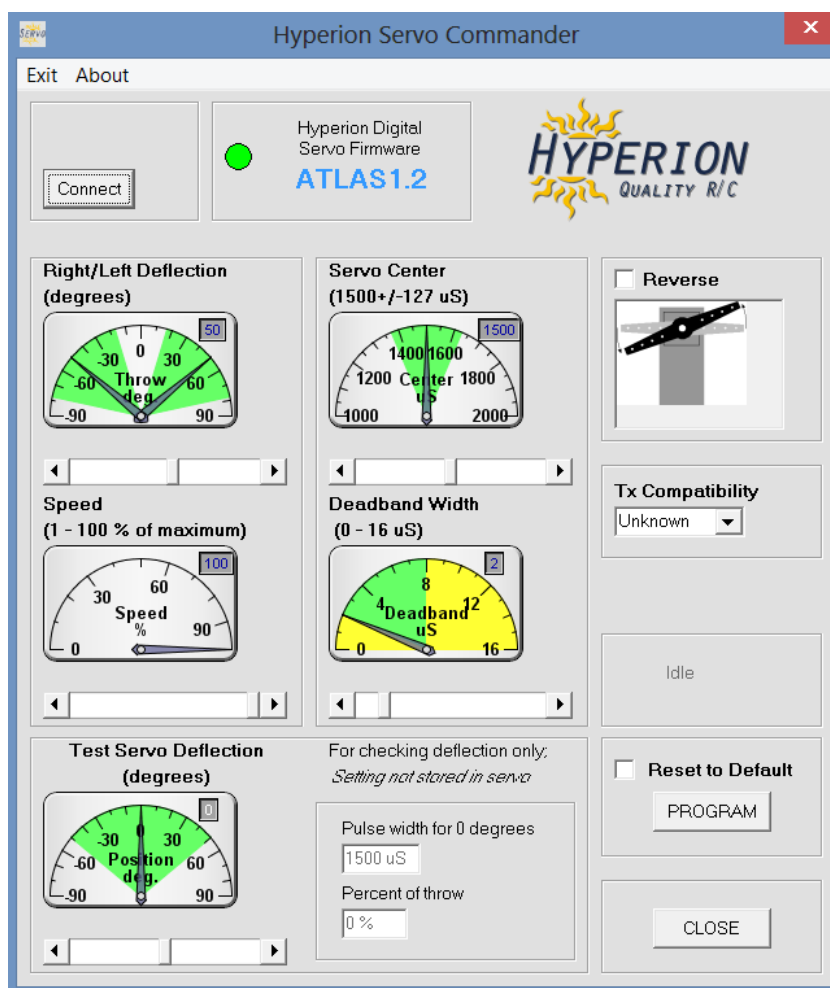
Nyní můžeme data zaslat. Použijeme přesně stejné schéma, jako bylo odposlechnuto, včetně neviditelných znaků. Je-li vše v pořádku, bude odezva systému shodná. Zobrazení proběhlé komunikace je zde:



Obrázek 3-8: Komunikace v Termite

Komunikace se schématicky shoduje s dříve odposlechnutou a došlo ke změně polohy serva. Princip komunikace je tedy zřejmě pochopen správně. Nyní zbývá pochopit strukturu dlouhého řetězce.

Pro pochopení je nutné vědět, jaké hodnoty je možné v programu ServoCommand změnit. Okno programu vypadá takto:



Obrázek 3-9: Okno ServoCommand

V programu je možné změnit parametr Deflection, Speed, Servo Center, Deadband Width, Reverse, Tx Compatibility a zcela dole je možné v kolonce Test Servo Deflection nastavit žádanou polohu pro zkušební účely. Pro úplnost je ještě nutné povšimnout si zcela nahoře údaje o verzi firmware s hodnotou „ATLAS1.2“.

Jako typický řetězec je možné vybrat třeba tento:
[0C]ATLAS1.205DC5A640000020016800400E7[0D]

Můžeme ignorovat neviditelné znaky na začátku a konci které slouží pouze k ohraničení zprávy. Hned na začátku vnitřní části pak vidíme řetězec „ATLAS1.2“ který je možné pozitivně identifikovat jako označení verze firmware jak se zobrazuje v záhlaví ServoCommanderu.

Tím zbývá 26 znaků vypadajících jako hexadecimální číslo. Pokud je budeme chápat jako hexadecimální čísla a rozdělíme je po dvojicích jak je typické pro bajtový zápis, dostaneme toto:

05 DC 5A 64 00 00 02 00 16 80 04 00 E7

Je důležité uvědomit si, že i když s těmito znaky budeme pracovat jako s hexadecimálními čísly, ve skutečnosti jimi z hlediska přenosu po sériové lince nejsou. Je to posloupnost na sobě nezávislých ASCII znaků. Nejde tedy o 13 bajtů, jak by se mohlo zdát, ale o 26. Každý znak je kódován vlastním

bajtem. Přestože tato skutečnost značně usnadnila pochopení protokolu, jde o velmi nevhodný přenos informace.

Pokud budeme předpokládat, že jde o hexadecimální čísla, dá se předpokládat, že každé reprezentuje některou z hodnot. To se dá jednoduše ověřit tak, že budeme v programu měnit vždy jeden parametr a sledovat změnu hodnot. Toto bylo provedeno a skutečně byla nalezena korelace. Prvních 7 dvojic bylo jednoznačně přiřazeno k nastavitelným parametrům v programu. Výjimkou je poslední dvojice, která se měnila vždy při každé změně parametrů, což by odpovídalo kontrolnímu součtu. Zbývajících 5 dvojic se neměnilo a nebyl určen jejich význam. Přiřazení hodnot parametrům je shrnuto v této tabulce:

05 DC	5A	64	00	00	02	00 16 80 04 00	E7
Poloha	Max. Výchylka	Rychlost	Střed	Reverzace	Deadband	Neurčeno	Kontrolní součet

Tabulka 3: Význam hodnot řetězce

V tabulce není uveden parametr TxCompatibility protože ten se na hodnotách neprojevil, jde pouze o výběr přednastavených parametrů ostatních hodnot.

U skupiny 5 dvojic na konci nebyl určen význam. Pravděpodobně jde o servisní parametry nebo o veřejně nedostupné měnitelné parametry. Typický kandidát by mohlo být nastavení PWM regulace motoru. Protože ale v této chvíli není možné k významu hodnot získat více informací, budeme s nimi pracovat pouze jako s konstantami.

U známých parametrů byl dále upřesňován jejich přesný význam a rozsah. Zjištěné skutečnosti jsou v tabulce:

Parametr	Význam hodnoty	Rozsah
Poloha	Decimální formát čísla vyjadřuje délku pulzu v us, kterému by odpovídala daná výchylka	DEC: 700-2300 us HEX: 02 BC – 08 FC
Max. Výchylka	Decimální hodnota vyjadřuje celkový maximální rozsah ve stupních pro hodnoty 1000-2000 us	DEC: 30-140° HEX: 1E – 8C
Rychlost	Decimální hodnota vyjadřuje % maximální rychlosti	DEC: 1-100% HEX: 01 - 64
Střed	MSB vyjadřuje směr, zbytek odchylku od středu v us	DEC: +-127us HEX: 00 – 7F MSB: 1 = +
Reverzace	Ano/Ne	HEX: 00 - 01
Deadband	Decimální hodnota vyjadřuje velikost mrtvého pásma v us	DEC: 0-16 HEX: 00 - 10

Tabulka 4: Rozsahy hodnot řetězce

Rozsahy je možné bez větších škod překračovat, ovšem servo v takovém případě nezareaguje. Řetězec s chybnou hodnotou servo zapíše do své paměti a bude se jím dál prezentovat, ale nedojde k realizaci významu chybné hodnoty.

Se znalostí polohy a významu parametrů je již jednoduché vytvořit řetězec s žádanými parametry. Stále však není možné tento řetězec odeslat do serva. Pokud není správně vypočtený kontrolní součet řetězce, servo jej ignoruje. Pro vytvoření platného řetězce tedy je nutné vytvořit kontrolní součet.

Nalezení algoritmu kontrolního součtu bylo složitější. Bylo vyzorováno, že může nabývat hodnot v rozsahu odpovídajícím jednomu bajtu, tedy 8 bitů. 8 bitový kontrolní součet je typický pro jednodušší kontrolní algoritmy. Pro ověřování možných algoritmů byl odposlechnut malý soubor platných řetězců s náhodnými hodnotami parametrů. Na tomto souboru poté bylo postupně vyzkoušeno několik jednoduchých součtových a XOR algoritmů, bez úspěchu. To naznačovalo, že by mohlo jít o složitější CRC-8 algoritmus. Bylo vyzkoušeno několik typických polynomů ale opět bez úspěchu. Protože možných CRC-8 polynomů není velké množství, jevila se jako dobrá možnost zkusit algoritmus prolomit hrubou silou. Za tím účelem začala tvorba nového, většího souboru platných řetězců, tentokrát ne náhodných ale systematických. Už na malém vzorku ale bylo patrné, že zřejmě o CRC algoritmus vůbec nejde. CRC algoritmus by měl v ideálním případě vytvořit pro dvě blízké vstupní hodnoty dvě velmi různé výstupní hodnoty, v novém souboru dat ale byly kontrolní součty velmi podobné. Proto byla myšlenka CRC algoritmu opuštěna a místo toho byla zkoumána podobnost součtů u blízkých řetězců. Tento směr se již ukázal správný a poměrně brzo byl nalezen algoritmus zpětného dopočtu hodnot řetězce z kontrolního součtu. Na základě tohoto úspěchu byl algoritmus nadále zkoumán až byl nalezen původní algoritmus kontrolního součtu.

Algoritmus výpočtu je ve skutečnosti velmi jednoduchý. Pro vypočtení kontrolního součtu stačí sečíst hodnoty všech znaků v řetězci po prvním neviditelném znaku. Důležité ale je, že součet musí být proveden s bitovou hodnotou, ne ASCII znakem, což je trochu neintuitivní, protože hodnota kontrolního součtu je následně zobrazena prostřednictvím ASCII znaků.

Algoritmus kontrolního součtu je Součet hexadecimálních hodnot ASCII znaků modulo FFSe znalostí algoritmu již je možné vytvořit libovolný platný řetězec a odeslat jej do zařízení. Vzhledem k množství výpočtů je tato metoda nepraktická pro zadání člověkem, ovšem neměl by být problém pro ni vytvořit program či rovnou knihovnu začleňovanou do programů.

Pokud by bylo použito řízení serva pomocí právě popsaného komunikačního protokolu, mělo by možné kdykoliv za chodu měnit provozní parametry, ale také doplnit čistě polohové řízení o kontrolu rychlosti. To je výhodné, pokud je zapotřebí, aby se rameno robotu pohybovalo pomaleji, ale přitom je žádoucí velmi plynulý pohyb.

Přestože popsaná metoda komunikace se zdá být výhodná, praktické testy ukázaly jednu zásadní nectnost. Tou je příliš nízká frekvence komunikace. Po každém odeslání zprávy je nutné vyčkat odpovědi serva s kontrolním součtem. Běžné zpoždění odpovědi se ale pohybovalo okolo 100ms nebo dokonce více. To znamená, že sice je možné servo řídit kvalitněji, než délkou pulzů, ale za cenu nižší frekvence povelů. To nemusí vadit u pomalých klidných pohybů, ale je to velký problém pro robot se s vysokou rychlostí a velkou četností změn pohybu.

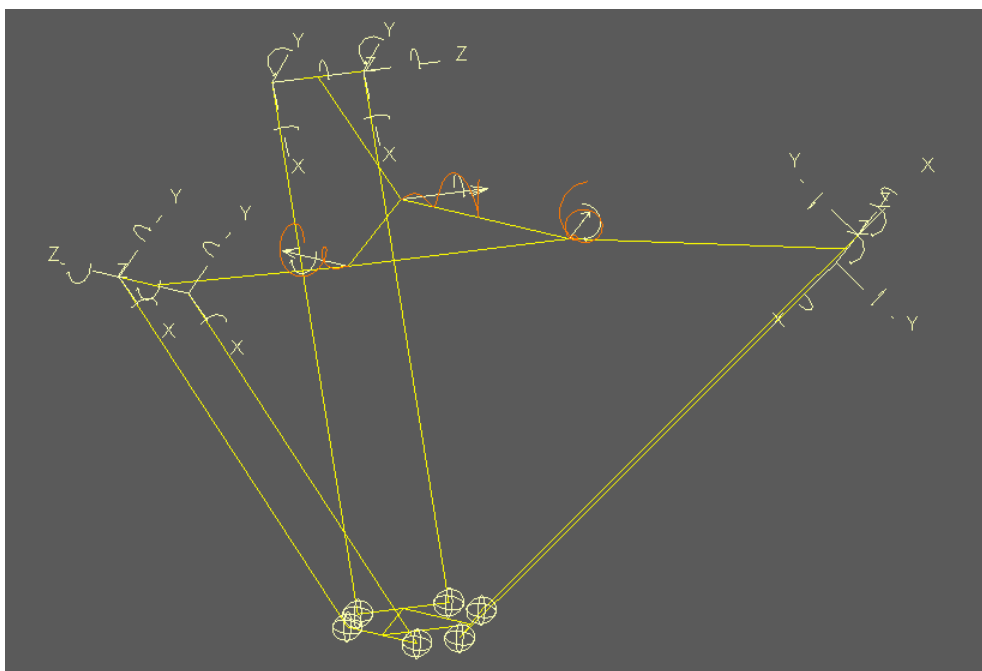
Tento problém dělá z protokolu pro žádaný účel nevhodné řešení. Důvod nízké rychlosti přitom není znám a není vyloučeno, že je ryze v software. Stálo by za to se otázce komunikačního protokolu dále věnovat a případně i zasáhnout do programu serva za účelem zlepšení vlastností. To ale už přesahuje rozsah této práce

4 Popis CAD 3D modelu

3D model v CAD programu Creo 2.0 se stal klíčovou částí práce a jeho existence výrazně usnadňovala konstrukční proces. A to jednak svou názorností, díky které nebylo nutné vyrábět průběžné modely mechanismu pro ověření funkčnosti, a jednak díky svým silným výpočtovým nástrojům, díky kterým z větší části odpadla monotónní výpočtová část návrhu.

Prvotní verze modelu vznikala na podzim roku 2012. V té době ještě nebyla rozhodnuta většina parametrů ani rozměrů, proto byl model tvořen co nejobecněji. Tak, aby šel postupnými průběžnými modifikacemi zdokonalovat.

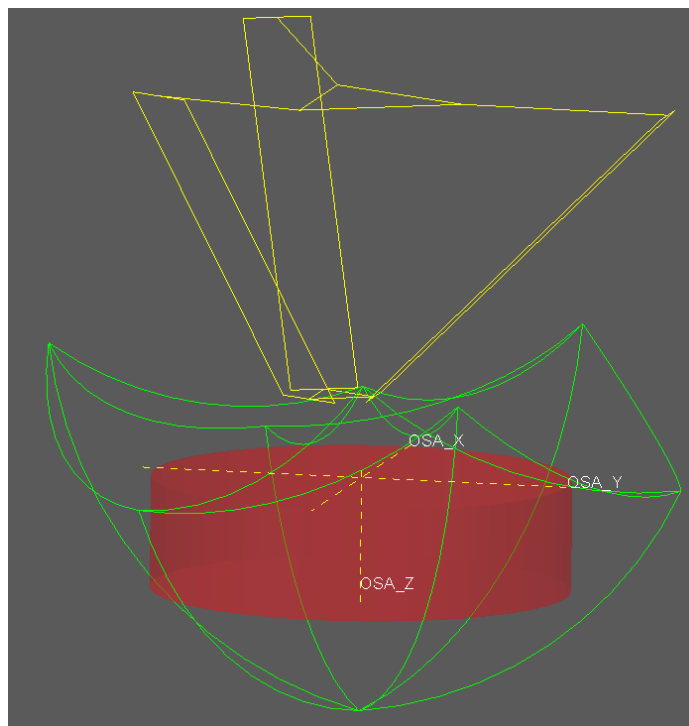
Základem modelu se stal pohyblivý Motion Skeleton. Pomocí několika skic byl vytvořen prostorový čárový model Delta robotu, a mezi jeho jednotlivé prvky byly zavedeny pohybové vazby. Původně byly vazby pouze dvou typů. Typu Pin, pro spojení horní části ramene s horní základnou, a vazby typu Ball pro napojení ramen paralelogramu. Tyto vazby by odpovídaly i skutečnosti. Protože ale prvky paralelogramu s vazbou Ball na obou svých koncích by měly jeden přebytný stupeň volnosti (rotaci okolo podélné osy) a to by se mohlo negativně projevit na přesnosti výpočtů, byla část vazeb Ball přeměněna na vazby typu General a v ní odebrán onen přebytný stupeň volnosti. To bude mít význam ve chvíli, kdy budou na skelet navázány jednotlivé komponenty modelu, které tak budou mít přesně definovanou pozici.



Obrázek 4-1: Motion Skeleton modelu

Během tvorby skeletu byly všechny konstrukčně významné rozměry zaznamenány do tabulky parametrů. Díky toho bylo možné velmi jednoduše měnit hlavní rozměry modelu, aniž by to ohrozilo jeho integritu. To byla výhoda jednak při hledání optimální velikosti pracovního prostoru, závislého na velikosti robotu, ale i později, na modelu s již navázanými komponentami, které byly rozměrově svázány relacemi a tedy se rovněž přizpůsobovaly změnám rozměrů.

Druhým krokem při tvorbě modelu bylo nalezení optimálních rozměrů pracovního prostoru vzhledem k velikosti robotu. Za tímto účelem byl v modelu vytvořen prostorový náčrt pracovního prostoru, svázaný relacemi s rozměry skeletu. Tvar pracovního prostoru je na dalším obrázku:



Obrázek 4-2: Pracovní prostor

Maximální pracovní prostor je vykreslen zelenými čarami. Tyto čáry jsou mimo jiné trajektoriemi pohybů koncového bodu v části práce, věnované dimenzování pohonů. Samotný tvar pracovního prostoru je dosti složitý. Má podobu šestistěnného tělesa, se stěnami tvořenými dutými a vypuklými kulovými plochami. V dřívějších verzích měl maximální pracovní prostor jiné proporce a počítalo se, že se v jeho plném rozsahu bude pohybovat i koncový bod skutečného robotu. V průběhu práce však byl po konzultaci s vedoucím diplomové práce maximální pracovní prostor změněn a doplněn o druhý typ pracovního prostoru – praktický. V obrázku je praktický pracovní prostor nakreslen červeným válcem. Důvodem je především větší praktičnost válcového prostoru a jeho jednodušší souřadnicový popis. Tento přístup k pracovnímu prostoru je shodný s tím, který je aplikován u průmyslových Delta robotů.

Pro takto definovaný pracovní prostor byly hledány ideální rozměry ramen. Nakonec se návrh ustálil na těchto rozměrech:

Rozměr	Velikost	Význam rozměru
Horní rám	70 mm	Vzdálenost rotačních kloubů ramen od osy symetrie horního rámu
Dolní rám	28 mm	Vzdálenost dolního prvku paralelogramů ramen od osy symetrie spodní (pohyblivé) plošiny.
Horní rameno	150 mm	Délka horního ramene, od rotační osy po společnou osu kulových kloubů
Dolní rameno	300 mm	Délka prvků paralelogramů mezi kulovými klouby
Průměr praktického pracovního prostoru	300 mm	
Výška praktického pracovního prostoru.	80 mm	

Tabulka 5: Délky ramen

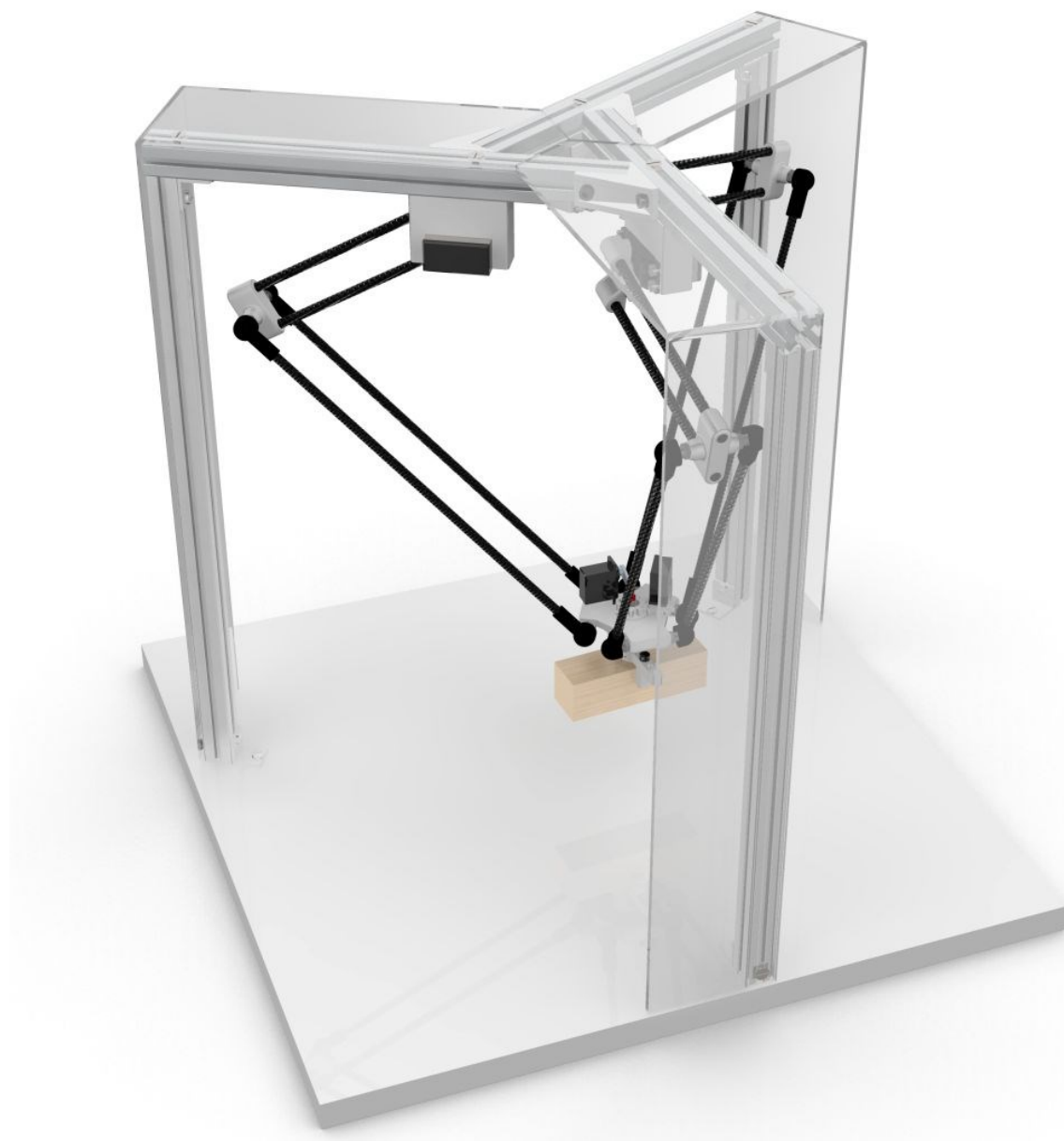
Omezení pracovního prostoru má ještě jednu výhodu. V krajních polohách maximálního pracovního prostoru se natáčejí kulové klouby prvků paralelogramů o hodně vysoký úhel, což by si vyžádalo speciální klouby. Omezení pracovního prostoru dovoluje toto natočení udržet pod kontrolou.

Dalším krokem tvorby modelu je navázání hmotných součástí na skelet. Tato část probíhala z velké části souběžně s hledáním vhodných rozměrů. Hlavním cílem bylo vytvořit hmotný model pro dynamickou analýzu momentového zatížení pohonů. Model v této fázi byl ještě velmi jednoduchý, bez detailů a bez jakýchkoliv podsestav. Obrázek 3-1 zachycuje vzhled modelu v této fázi.

Po vybrání vhodných motorů a v souvislosti s tím, jak klesal stupeň informační neurčitosti, byl model postupně obohacován o další detaily, jednoduché díly nahrazovány za podsestavy a ty následně obohacovány o ještě další detaily. Jednoznačně se zde ukázala výhoda tvorby modelu s využitím Motion Skeletonu, protože ani při masivních úpravách nedocházelo k poškození vazeb mezi součástmi nebo dokonce ke zhroucení modelu. Během postupu byly v pravidelných intervalech opakovány výpočtové analýzy, aby se ověřilo, jestli se předběžný výpočet nezačíná příliš vzdalovat konečným výsledkům.

Konečný model se skládá ze sedmi unikátních podsestav a 37 různých dílů. Celkem se model skládá ze 171 částí.

Finální model byl použit pro vyrenderování ilustračních obrázků ve fotorealistické kvalitě. Obrázek 4-3 zachycuje příklad takového renderu.

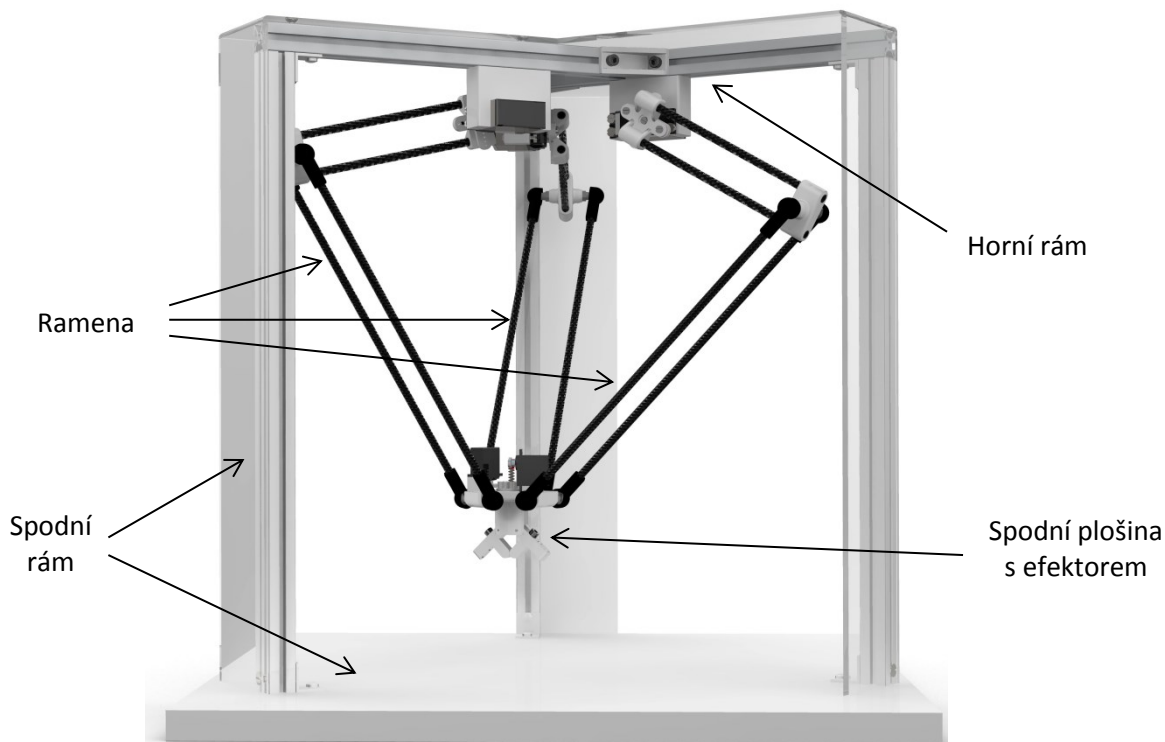


Obrázek 4-3: Konečná podoba modelu

5 Popis konstrukce

V této části práce bude popsána konečná podoba robotu jako celku, popis jednotlivých podsestav a následně dílů. Tam, kde to je účelné, bude popsána i evoluce dané části, odůvodněno řešení, popsány zkušenosti z praxe nebo problémy a jejich možné řešení, pokud se vyskytly.

5.1 Sestava



Obrázek 5-1: Čelní pohled s podsestavami

Robot je vytvořen jako kompaktní celek o půdorysu 0,5x0,5m s výškou 484mm. Hmotnost robotu je přibližně 5,2kg, přičemž na pohyblivé části ale připadá pouze asi 230g. Nízká hmotnost pohyblivých částí je dobrým předpokladem pro vysokou dynamiku robotu, zatímco v poměru mnohem vyšší vlastní hmotnost zajišťuje stabilitu. Hmotnost těsně přes 5kg přitom nepředstavuje zásadní zátěž z hlediska přenášení robotu.

Jádrem robotu jsou tři ramena v jeho středu, rozmístěná symetricky okolo středové osy robotu a rozbíhající se do stran. Ramena se svými spodními konci sbíhají na pohyblivé spodní plošině s efektozem. Horními konci jsou ramena upevněna k servům a i s nimi jsou podvěšena pod nosným hliníkovým rámem. Hliníkový rám představuje dominantu robotu. Zachovává symetrii ramen a kopíruje jejich umístění. Hlavním účelem rámu je nosná funkce, jeho vedlejší rolí je ale i ochrana ramen například před pádem předmětu. V tomto rámu pomáhají i plexisklové kryty na něm nasazené.

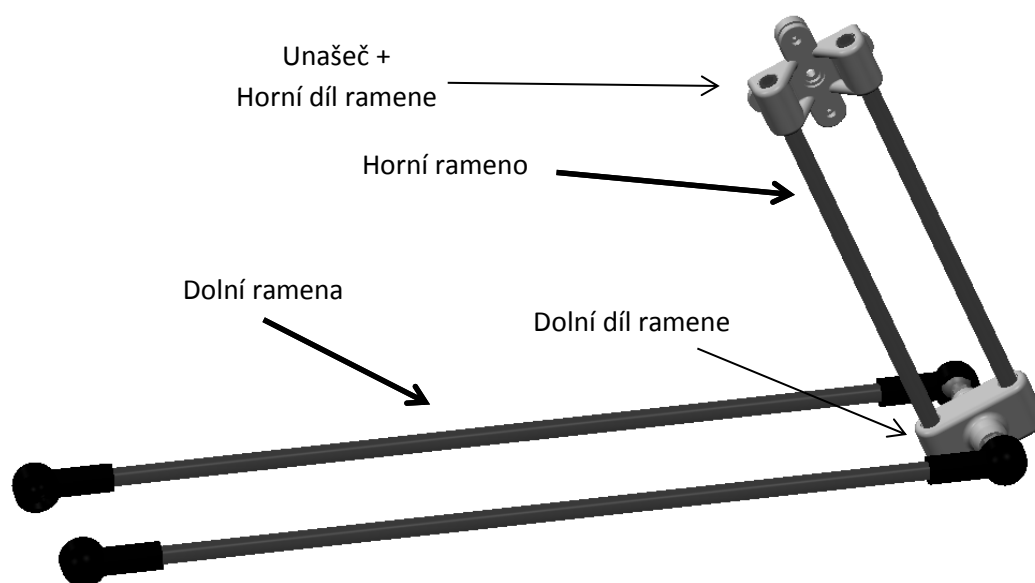
Uprostřed robotu se nachází pracovní prostor. Ten je tvořen válcem o průměru 300mm a výšce 80mm. Svou spodní plochou je pracovní prostor v kontaktu s deskou spodního rámu, takže je robot schopný pracovat až téměř na její ploše. Boční nohy s plexisklovými kryty pracovní prostor opticky oddělují, ale přitom je mezi nimi dostatek místa pro neomezený přístup do něj.

Co se týče konstrukce jako celku, je vhodné zmínit, že i když primárním kritériem během celé doby návrhu byla funkce, nezůstával stranou ani design. Protože má jít o robota určeného k prezentačním účelům, je vzhledová stránka velmi důležitá. Elegantně působící mechanismus zaujme mnohem více, než sice funkční, ale ošklivý stroj. S ohledem na design je například řešený nosný rám robotu a plexisklové kryty. Stejně tak je ovlivněné barevné řešení robotu, který je v maximální možné míře řešený v černé a bílé barvě.

Další popis konstrukce bude pokračovat u jednotlivých podsestav. Ty lze na robota identifikovat celkem čtyři a jsou zobrazeny na čelním pohledu na robot (Obrázek 5-1). Jsou to ramena, horní a dolní rám a spodní plošina s efektozem.

5.2 Podsestavy

5.2.1 Ramena



Obrázek 5-2: Horní a dolní rameno

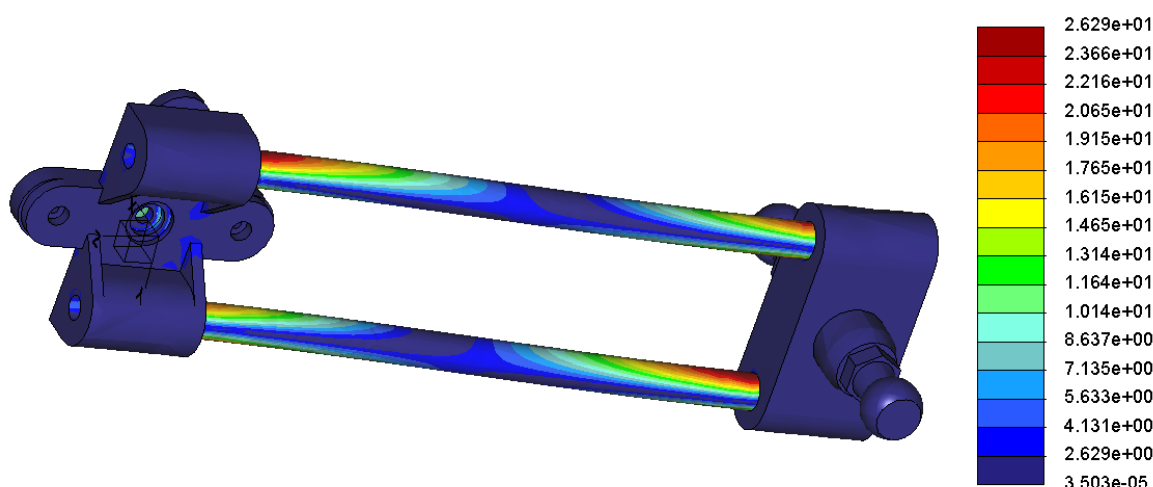
Rameno je možné rozdělit na horní a dolní.

Horní rameno tvoří jeden celek. Prvním prvkem je unašeč serva, který rameno připojuje na servo a zajišťuje přenos krouticího momentu. Na unašeč je dvěma šrouby velikosti M3 upevněn horní tištěný díl a ten je dvěma uhlíkovými trubkami spojen se spodním tištěným dílem. Trubky jsou v tištěných dílech zalepeny epoxidovým lepidlem. Ve spodním tištěném dílu jsou zašroubovány z obou stran kulové čepy.

Spodní ramena jsou dvě a tvoří prvky paralelogramu. Obě mají velmi jednoduchou konstrukci, protože jsou tvořeny pouze dvěma kulovými pouzdry a uhlíkovou trubkou mezi nimi. Paralelogram jimi tvořený je uzavřen osou horního ramene a spodní plošiny.

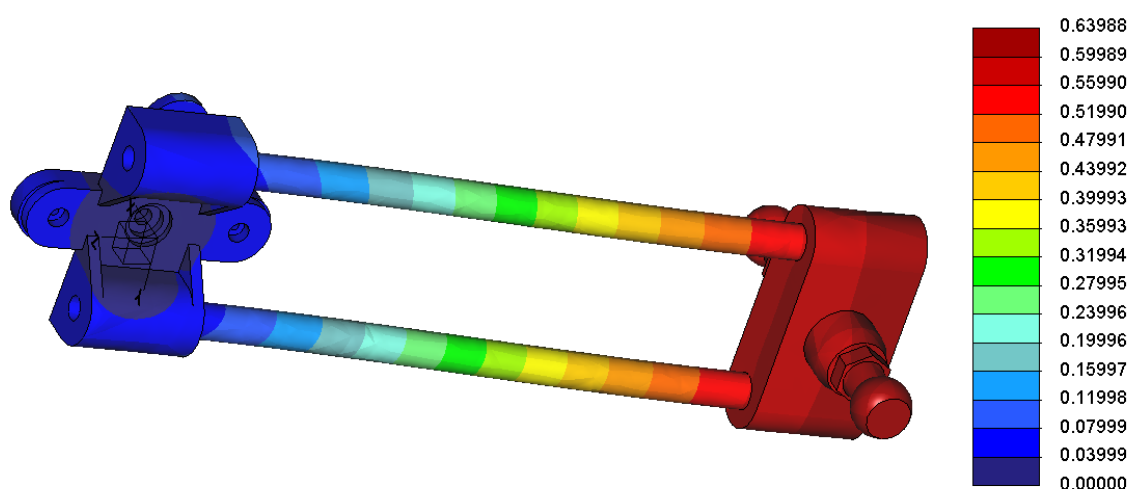
U horního ramene původně konstrukce počítala s pouze jednou trubkou většího průměru, podobně jako je to řešeno například u robotu ABB Flexpicker. Později však konstrukce přešla na uspořádání se dvěma paralelními trubkami menšího průměru. Důvodem bylo zjednodušení konstrukce, protože tím v horním a dolním tištěném dílu vznikl mezi trubkami prostor. V horním dílu na šrouby k unašeči a na spodním na kulové čepy. Použité trubky jsou zároveň stejného průměru jako v dolních ramenech, takže nebylo nutné opatřovat více průměrů.

Pro ověření pevnosti v ohybu a velikosti deformace byla na horním rameni provedena v programu Creo, modulu Simulate, pevnostní analýza. Osa unašeče byla zablokována a na osu kulových čepů byla aplikována síla. Její velikost byla zvolena tak, aby vyvolala maximální krouticí moment na servu (2,4Nm) a její orientace tak, aby způsobovala výhradně ohybové zatížení ramene.



Obrázek 5-3: Analýza napětí

Maximální napětí se nachází na koncích uhlíkových trubek a největší hodnota dosahuje přibližně 26,3 MPa. Protože mez pevnosti uhlíkového kompozitu v tahu běžně dosahuje 1500MPa (1200MPa v tlaku), lze označit rameno za jednoznačně vyhovující. Velký rozdíl mezi vypočteným a maximálním napětím je dobrým znamením z hlediska tuhosti ramene.



Obrázek 5-4: Analýza deformace

Deformace v krajním bodě dosahuje přibližně 0,64mm. Je ale nutné pamatovat, že to odpovídá maximálnímu momentu na servu. Při běžném provozu by měly být moment na servu nižší, což znamená i menší ohybovou sílu. S uvažováním k vypočteným momentům na servech se dá očekávat, že deformace na rameni nebudou překračovat hodnotu 0,1mm a jako takové je možné je považovat za zanedbatelné.

Co se týče napětí v tahu, vzhledem k velmi vysoké pevnosti uhlíkových kompozitů a relativně malému zatížení se dá očekávat stejně jako při ohybu extrémní předdimenzování. Ještě před roztržením trubky by došlo k destrukci kulových kloubů nebo poškození lepeného spoje

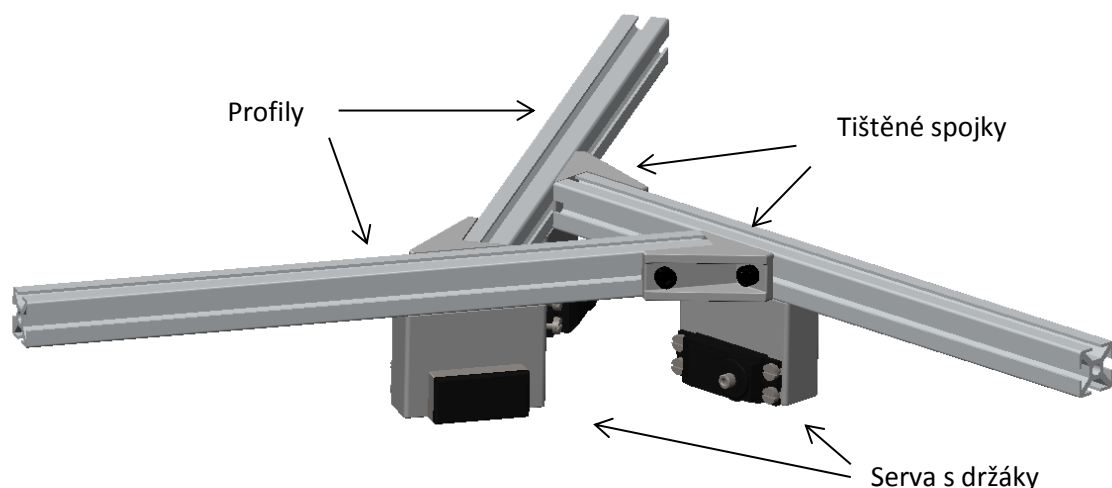
Stejná situace je i u dolních ramen. Ta mohou být čistě z principu namáhána výhradně tahem. I u nich jsou ale trubky nutně předimenzované.

K lepení trubek do tištěných dílů bylo použito epoxidové lepidlo UHU plus 300kg s dobou vytvrdnutí při 20°C 12h. Deklarovaná pevnost při tomto stupni vytvrzení je 120kg/cm². Plochy lepených spojů jsou přibližně 3cm². To znamená, že při dokonalém nanesení a vytvrzení lepidla by na roztržení lepeného spoje byla zapotřebí síla kolem 3,5kN. K dokonalému nanesení a ni vytvrzení jistě nedojde, ale i tak je zaručeno, že pokud nedojde k pochybení při montáži lepené spoje musí vydržet.

Montáž ramen probíhala takto: Do otvoru tištěného dílu bylo nanášeno malé množství lepidla a opatrně rozetřeno po stěnách otvoru. Poté byla zasunuta připravená uhlíková trubka a z druhé strany setřeno lepidlo. Pro zalepení dílů v přesně žádoucí poloze byly na papír nakresleny šablony a díly rozmístěny a zafixovány podle nich. S pomocí precizní práce byly díly ustaveny tak, že ramena vzájemně vykazovaly odchylky do půl milimetru. Pro ještě větší přesnost by ale určitě bylo vhodné používat účelově vyrobené přípravky.

S rameny jako celkem se po namontování nespojovaly žádné významnější problémy s výjimkou (očekávané) nižší tuhosti horního ramene v krutu. Ta se projeví, pokud na spodní plošinu začne působit klopný moment. Taková situace ale v provozu není očekávaná. Pokud by ale přesto bylo žádoucí tuhost v krutu zvýšit, šlo by to udělat buď nahrazením dvou trubek jednou větší, nebo zvýšením počtu malých trubek ve svazku.

5.2.2 Horní rám



Obrázek 5-5: Horní rám

Horní rám představuje pro provoz nejnutnější statickou základnu. Je tvořen trojicí hliníkových profilů, tištěnými spojkami profilů a podvěšenými drážky na serva se servy.

Hliníkové profily jsou stavebnicové profily společnosti ITEM o rozměru 20x20. Všechny tři profily jsou rozmístěny okolo středu v pravidelném intervalu 120°, nicméně jsou proti svislým rovinám procházejícím středem posunuty o 33mm. Tato vzdálenost je kvůli posunu os ramen od úchytů serv. Rám byl navržen tak, aby bylo možné v případě potřeby serva i s rameny posouvat po délce profilu a tím měnit vzdálenost ramen od osy robotu.

Profily jsou do sebe zapřeny a spojeny tištěnými spojkami. Díky tomuto vzájemnému zapření se rám výrazně zpevnil a uprostřed mezi profily vznikl malý trojúhelníkový prostor. Ten může být (a je) použit například pro řídicí elektroniku.

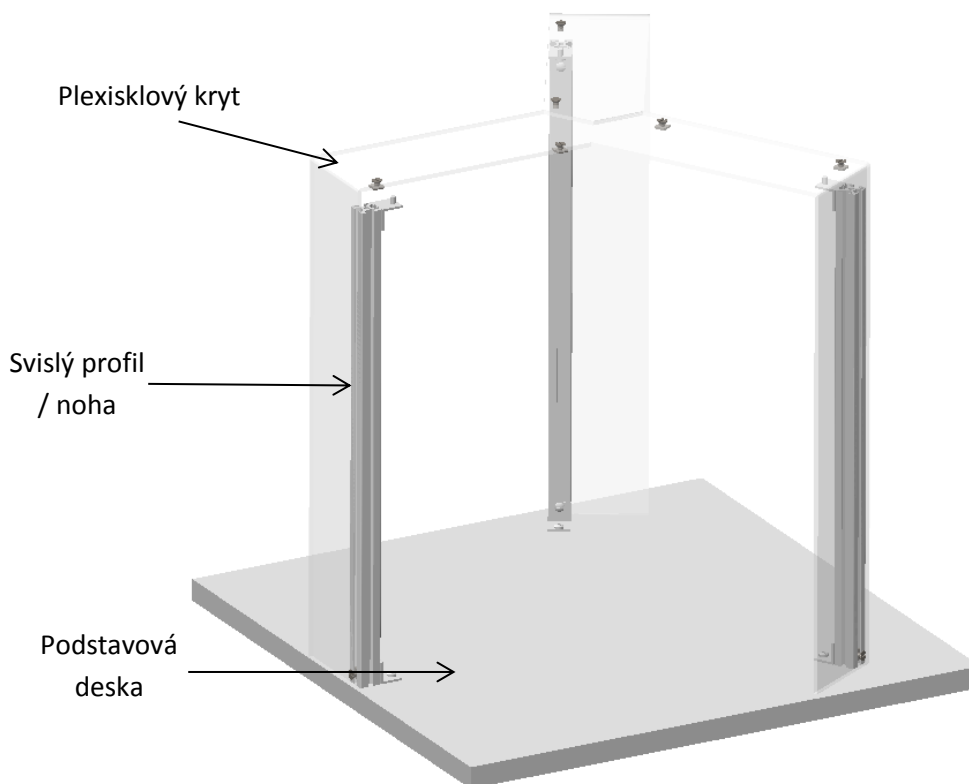
Spojky profilů jsou uchyceny k profilům pomocí dvou šroubů M5 a čtvercových matic. Z estetických důvodů byly vybrány černěné šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Protože spojky jsou bílé, černé šrouby vytvářejí barevný kontrast.

Držáky serv jsou k profilům uchyceny rovněž dvěma šrouby M5. Do držáků jsou zasunuta serva a vzájemně jsou do držáku uchycena vždy čtveřicí šroubů M4. Původně měly být i zde černěné šrouby, ale nepovedlo se je sehnat v žádoucím rozměru.

Montáž horního rámu byla poměrně složitá, a to kvůli problémům s ustavením profilů ve správných vzdálenostech a se správným vzájemným úhlem. Protože správné smontování je naprosto klíčové pro přesnost robotu, bylo nutné mu věnovat dostatek času a péče. Stejně jako u lepení ramen zde pomohla papírová šablona. Pokud by se to mělo dělat častěji, určitě by byl žádoucí ustavovací přípravek.

Při provozu se s horním rámem neprojevaly žádné problémy.

5.2.3 Spodní rám



Obrázek 5-6: Dolní rám

Spodní rám představuje zbytek nosné struktury, která ale už nemá zásadní vliv na funkci robotu. Skládá se ze tří svislých hliníkových profilů, podstavové desky a plexisklových krytů.

Profily jsou stejného typu a průřezu jako profily horního rámu. Jejich účelem je nesení horního rámu a zbytku robotu, respektive jejich propojení s podstavou robotu. Na jednom konci svislých profilů leží horní rám, protilehlou stranou svislé profily stojí na podstavě. S horním rámem i

s podstavovou deskou jsou spojeny pomocí drobných L úhelníků a šroubů M5, respektive vrutů 4,3mm.

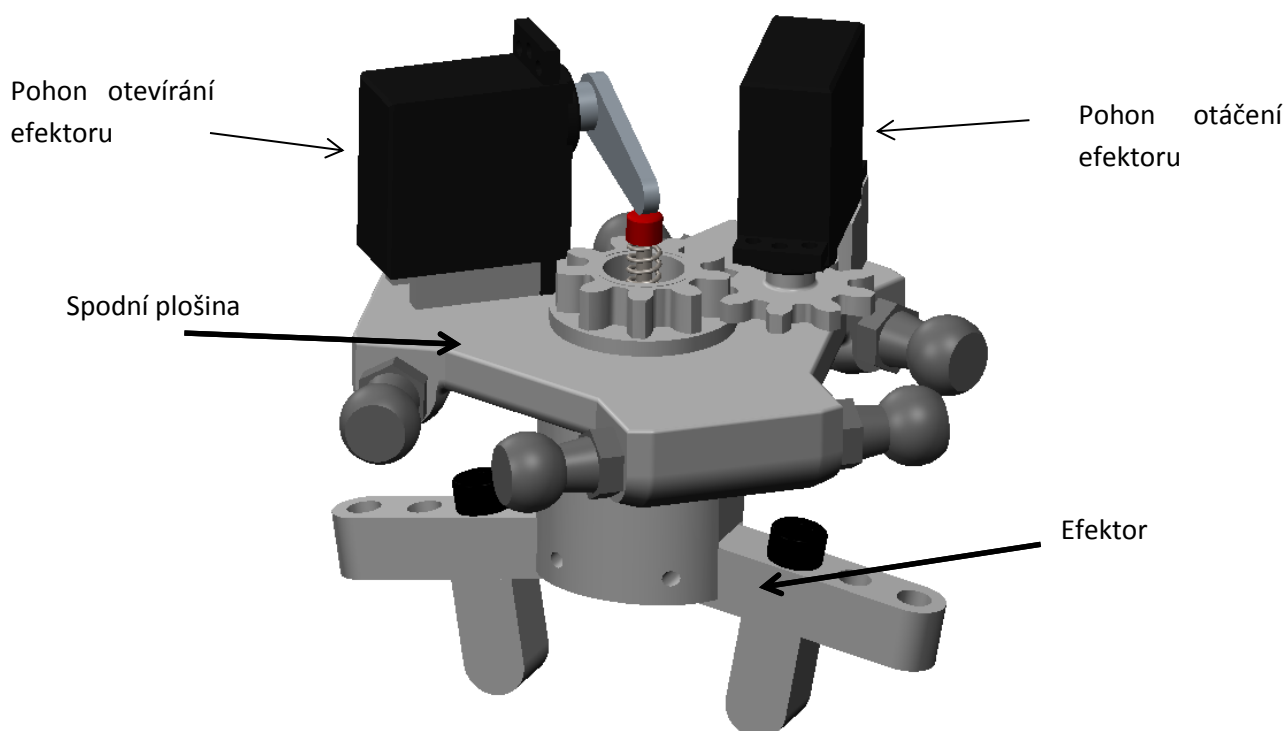
Podstavová deska je obyčejná bílá dřevotřísková deska 0,5x0,5m s tloušťkou 18mm. Její funkcí je stabilizovat celou konstrukci robotu. Výhodou je její poměrně velká hmotnost, díky které se snížilo těžiště robotu. Druhou funkcí podstavové desky je, že slouží jako pracovní stůl. Její výšková pozice je taková, že se nachází těsně pod praktickým pracovním prostorem. Do budoucna by mohlo být praktické na ni trvale nakreslit souřadnice pracovního prostoru.

Plexisklové kryty jsou na robotu především jako ochrana ramen před poškozením. Jejich druhotnou rolí je ale i mírné zpevnění nosného rámu robotu. Jsou přichyceny pomocí tří šroubů M5 se záпустnou hlavou.

Při montáži spodního rámu se nevyskytly problémy, pouze bylo nutné kvůli vnitřním rádiům krytů zbrusit po jedné hraně hliníkových profilů.

Po uvedení do provozu se však v konstrukci spodního rámu objevil problém. Během navrhování robotu ve fázi 3D modelu byly pro zjednodušení vypuštěny téměř všechny spojovací součásti. Tento přístup se ale vymstil, protože v konstrukci nebylo vyčleněno místo pro spojovací L-úhelníky a šrouby. Důsledkem pak bylo, že šrouby kolidovaly s kulovými klouby ramen. Pro vyřešení problému naštěstí stačilo sehnat šrouby s nižší hlavou, nicméně k tomuto typu problémů by docházet nemělo.

5.2.4 Spodní plošina s efektozem

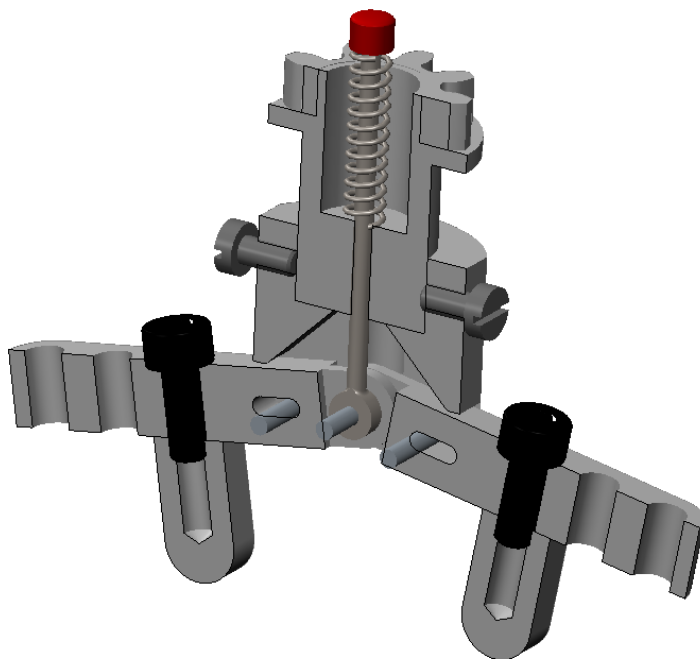


Obrázek 5-7: Spodní plošina s efektozem

Spodní plošina s efektozem je kompaktní, ale zároveň poměrně složitou podsestavou. Dá se rozdělit na samostatnou spodní plošinu, jejímž hlavním úkolem je propojení tří ramen, a na efektor, nesený spodní plošinou.

Spodní plošina je tvořena velkým tištěným dílem, který má v sobě zašroubováno šest kulových čepů. Uprostřed spodní plošiny se nachází otvor, ve kterém se může otáčet efektor. Vedle efektoru jsou na spodní plošině dva držáky serv a miniaturní serva, sloužící jako pohony efektoru. Jedno ze serv s efektozem otáčí okolo svislé osy, druhé vačkovým mechanismem otevírá čelisti.

Umístěním pohonů na spodní plošinu se robot liší od komerčních delta robotů. Ty mají téměř vždy pohon čtvrté osy řešen pomocí teleskopické hřídele ze základny (horního rámu). Tato koncepce byla samozřejmě rovněž uvažována, ale nakonec byla zamítnuta. Při drobné velikosti robotu by teleskopická hřídel pravděpodobněji vyšla hmotnostně stejně nebo hůř než pohon přímo na plošině. Přitom by se ale zvětšila složitost systému.



Obrázek 5-8: Řez efektozem

Efektor je jednoduché konstrukce s pohybem čelistí ovládaným táhlem a kulisovým převodem. Efektor je navržen tak, aby splnil dva požadavky. Jedním z nich je možnost neomezeného otáčení okolo svislé osy. Druhým je samosvornost. Možnost neomezeného otáčení je možná díky vačkovému převodu otevírání čelistí, které funguje při libovolném natočení. Samotný pohon otáčení efektoru byl ozubeným převodem odsunut mimo osu efektoru.

K otevírání efektoru dochází zatlačením táhla ve středu efektoru dolů. Táhlo tlačí dolů konce čelistí a ty se vedeny kolíkem ve výřezu otevírají. Zavírání efektoru je samočinné a stačí přestat tlačit na středové táhlo. Pružina táhlo vytáhne zpět nahoru a s ním i konce čelistí. Čelisti se opět pohybují podle kolíků a zavírají se.

Na čelistech jsou šrouby přichyceny dva prsty, které vykonávají uchopení. Jsou schválně vymyšleny jako výměnné a s možností montáže na více pozic na čelistech. Záměrem je co největší univerzálnost efektoru.

Úchopná síla efektoru je vyvozena pouze silou pružiny. To zjednodušuje návrh pohonu, který tak musí mít sílu pouze na přetlačení pružiny. Úchopná síla se mění s rozevřením čelistí, přičemž nejvyšší hodnoty dosahuje při plném otevření. Velikost síly byla analyzována v počítači a při síle

10N na táhle má úchopná síla velikost 3,8N. To je poměrně nevýhodný poměr, který je však daní za zvolenou koncepci efektoru a jeho rozměry. V rámci dalšího pokračování projektu by však mohlo být výhodné hledat jiné koncepce efektoru.

Přestože byl efektor navrhován s ohledem na možnost neomezeného otáčení, v době odevzdání této práce toho není schopen. V otáčení je efektor omezen rozsahem natočení serva, který je přibližně 140°. Pro neomezený rozsah by bylo nutné upravit servo. Konkrétně odstranit mechanické zarážky a přemostit potenciometr. Tím by se servo otáčelo neomezeně. Bylo by ale ještě nutné zajistit zpětnou vazbu polohy, například optickým enkodérem. Robot je pro tuto úpravu připraven, ale z časových důvodů nebyla provedena.

Efektor je sestaven převážně z tištěných dílů, jejichž sestavení občas provázely komplikace. Ty ale budou popsány v další části u popisu jednotlivých dílů. S efektozem jako celkem se při montáži větší problémy neobjevily. Z hlediska provozu se ukázal být problém nízký koeficient tření mezi prsty čelistí a uchopovaným předmětem. Spolu s nízkou úchopnou silou to znamená že u některých předmětů není držení zcela spolehlivé, zvláště při pohybu robotu. Řešením by mohlo být nalepení gumových pásků na čelisti, čímž by se koeficient tření zvýšil.

5.3 Popis dílů

Tato část se věnuje stejným způsobem jednotlivým dílům. Budou detailně popsány, uvedeny jejich specifikace a rozebrány vlastnosti.

5.3.1 Tištěné díly

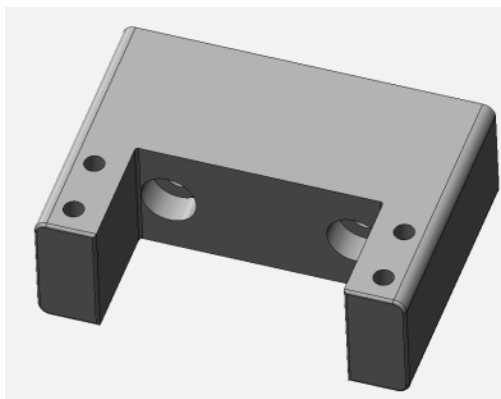
Majorita dílů robotu je vyrobena 3D tiskem, proto budou probrány společně a jako první.

S 3D tiskem jsem dosud neměl významnou zkušenost, proto zde bylo velké množství neznámých. Například tvarová a rozměrová přesnost, kvalita povrchu, pevnost a pružnost dílů. Co čekat jsem předem konzultoval a výsledky se obecně shodovaly.

Díly byly vytisknuty na 3D tiskárně Fortus 360mc L z bílého polykarbonátu. Tvarová přesnost je velmi dobrá, nejsou pouze zachovány některé velmi drobné detaily nebo ostré hrany (v závislosti na poloze hrany a orientaci tisku). Rozměrová přesnost je s výhradou taktéž velmi dobrá. Výhrada je v tom, že vlivem roztékání plastového vlákna při tisku je jakákoliv stěna vždy posunuta o cca 0,1mm do prostoru (tzn. například válec bude mít o 0,2mm větší průměr, otvor naopak o 0,2mm menší). Na toto jsem byl předem upozorňován a na většině dílů jsem provedl potřebné úpravy, které to kompenzují. U takto upravených dílů se nevyskytly žádné problémy s pasováním.

Povrch je obecně nerovný, jakoby vroubkovaný, s jasně patrnými stopami vrstev a kladení vláken při tisku. Na robotu to na většině dílů nepředstavuje problém, jinak by s tím bylo nutné počítat. Pevnost materiálu je dobrá, ale je velmi náchylný na praskání. U větších dílů proto byla zvolena pružnější (a lehčí) voštinová výplň, u které je riziko menší. Většina dílů je jinak velmi tuhá, výjimkou je pouze táhlo efektoru (viz níže).

Držák serva



Obrázek 5-9: Držák serva

Jedná se o tvarově jednoduchý U díl, který má být z jedné strany podvěšen pod profilem rámu pomocí dvou šroubů, a z druhé strany je do něj vloženo servo. Servo je následně k držáku uchyceno čtyřmi šrouby M4.

Díl byl tištěn na plocho tak, aby slepé díry pro šrouby uchycení serva nebyly zaplněny výplňovým materiálem. Horní, masivnější část dílu je tištěna jako voština.

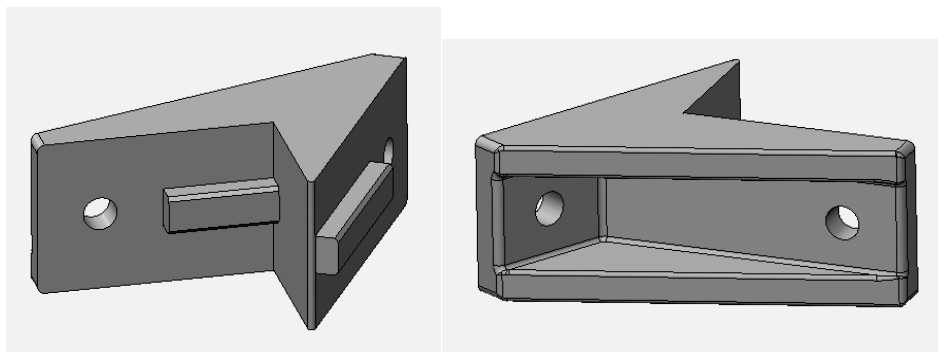
Na dílu byla ve fázi montáže zjištěna pouze jedna návrhová chyba, která byla snadno napravena. Ve snaze zmenšit počet průměrů šroubů byly zvoleny jako šrouby pro montáž k rámu robotu šrouby velikosti M4. Při montáži se však ukázaly jako vhodnější šrouby M5, které potřebují větší otvor. Řešením bylo převrtání otvoru na větší průměr. Stačilo převrtat pouze průchozí otvor, zahloubení pro hlavu bylo dostatečné, protože s variantou použití M5 šroubů se počítalo už při návrhu, byť tehdy nešlo o očekávané řešení.

Jiné problémy při montáži se neprojeví. U této součásti nebyla kompenzována přesnost tisku, ale protože serva měla náležité rozměry právě o 0,1mm menší, neobjevil se problém. Radius na vnitřní hraně je stejný nebo menší jako radius na servu.

Mezi doporučené úpravy do budoucna patří jednoznačně zvětšení otvoru na šrouby na patřičnou velikost. Dále v návaznosti na použité servo by bylo vhodné kompenzovat rozměry výřezu pro něj. Ne každé servo musí mít adekvátní tolerance rozměrů. Poslední funkční doporučení se týká přesnosti polohy montáže na hliníkové profily. Při montáži je nutné dbát na zarovnání držáku ke stěně profilu, aby držák nebyl pootočený. Toto by možná šlo zjednodušit, kdyby na straně profilu byly na držáku výstupky, podobně jako na spojkách profilů (viz níže). Bylo by ale nutné posoudit, jestli to je účelné s ohledem na výrobu

Další doporučení jsou už ryze estetického charakteru. První je samotný tvar. Kvádr s výřezem je sice funkčním řešením, ale esteticky nepůsobí zcela nejlépe. Tvar byl zvolen s ohledem na minimalizaci rozměrů součásti, protože na monitoru počítače byly chybně vnímány rozměry. Součást je ve skutečnosti dost malá a esteticky zajímavější tvar by jí nemusel vadit. Druhé doporučení se týká závitů pro přišroubování serva. Ty jsou poměrně krátké, což si vyžádalo krátké šrouby, konkrétně M4x8. Šrouby této délky se ale běžně vyrábí jen s čokovou hlavou a křížovou drážkou, což vzhledově nepůsobí tak dobře, jako kdyby byly použity šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Doporučením tedy je prodloužit tyto závity tak, aby bylo možné použít šrouby s válcovou hlavou.

Spojka profilů



Obrázek 5-10: Spojka profilů

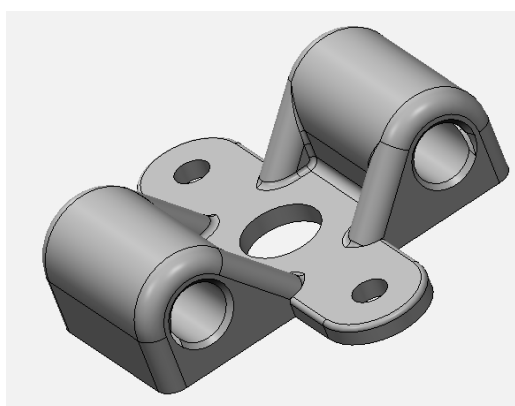
Spojka představuje tvarově poměrně složitý díl, určený k spojení hliníkových profilů pod úhlem 120°. Upevňuje se na konec jednoho profilu, a na stranu střední části druhého profilu. K oběma profilům je spojka připojena jedním šroubem a výstupkem, který pasuje do drážky profilu

Nutné úpravy se shodují s držákem serv. I zde se původně počítalo se šrouby M4 a nakonec byly použity M5. Po převrtání otvorů však byl problém vyřešen. Další úprava se týká radiusu vnitřní hrany v prostoru pro konec profilu. Přestože v modelu žádný není, technologie výroby jej tam vytváří, byť s minimálním poloměrem. Hrana hliníkových profilů ale je ostrá, což způsobuje, že profil nemůže zcela dosednout svým koncem. Protože výstupek do drážky znemožňuje dodatečné vybroušení hrany, je nutné buď zabrousit hranu profilu, nebo se smířit s mezerou o velikosti pár desetin milimetrů.

Při montáži se objevila jedna další nesnáz, a sice že výstupky do drážek zapadaly příliš těsně a znemožňovaly posun profilu v drážce. To sice ve výsledku zvyšuje tuhost konstrukce, ale ztěžovalo to sestavení rámu, které vyžaduje přesné rozměry.

Doporučení do budoucna se týká velikosti otvorů pro šrouby (zvětšit), šířky výstupků (nepatrně zmenšit) a radiusu zmíněné hrany, který by šel eliminovat zahloubením v tom místě. Jinak k dílu nejsou žádné výhrady, funkčně i esteticky je velmi dobrý.

Horní díl horního ramene



Obrázek 5-11: Horní díl horního ramene

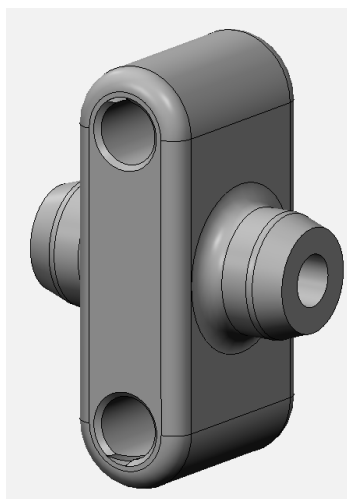
Horní díl horního ramene představuje spojku mezi unašečem serva a uhlíkovými trubkami horního ramene. Byl tvarován tak, aby pasoval na unašeč křížového tvaru, kdy k jednomu páru ramen je díl přišroubován a kolmý pár ramen podpírá části s trubkami a zabraňuje jejich kroucení. Uprostřed dílu je otvor, přes který je možné odšroubovat šroub unašeče a celé rameno i s unašečem ze serva sundat. Otvory pro trubky mají rozteč 28mm, vnitřní průměr 6mm a v jejich vnitřním povrchu je vytištěna 0,5mm hluboká drážka pro zachycení lepidla. Celý díl je osově symetrický okolo osy serva.

Díl si vyžádal jednu úpravu, a sice převrtání otvorů pro trubky. Protože v době tisku nebyly dostupné uhlíkové trubky a nebyl znám jejich přesný vnější průměr, panovaly obavy, aby nebyl příliš malý nebo velký. Proto nebyl průměr kompenzován o očekávanou nepřesnost tisku s tím, že v případě potřeby budou otvory převrtány. Po vytištění byl naměřen vnitřní průměr okolo 5,8mm. Po doručení trubek byl naměřen jejich vnější průměr 5,9mm po celé délce, a tak do dílu volně nepasovaly. Díl byl následně převrtán vrtákem o průměru 6mm (který na základě vizuální inspekce spíše než vrtal jen otvor v některých místech mírně přibrousil) a poté trubky do otvorů ideálně pasovaly.

Při montáži se objevil nedostatek v absenci křížového unašeče v balení serv, v důsledku čehož musel být použit unašeč přímý. To sice nemá na díl žádný negativní vliv, ale mohl být zvolen jiný tvar.

Doporučením do budoucna je upravit průměr otvorů na trubky tak, aby pasovaly bez převrtávání (možné samozřejmě jen pokud je s předstihem znám přesný průměr trubek). Druhým doporučením je upravit tvar základny podle skutečně použitého unašeče. Týká se to zejména ne příliš vzhledných ostrých hran pod otvory na trubky, které mohly kopírovat zakulacení z horní části. Co se naopak na dílu osvědčilo, jsou drážky na lepidlo, díky kterým trubky drží i při těsném zapasování do dílu.

Dolní díl horního ramene



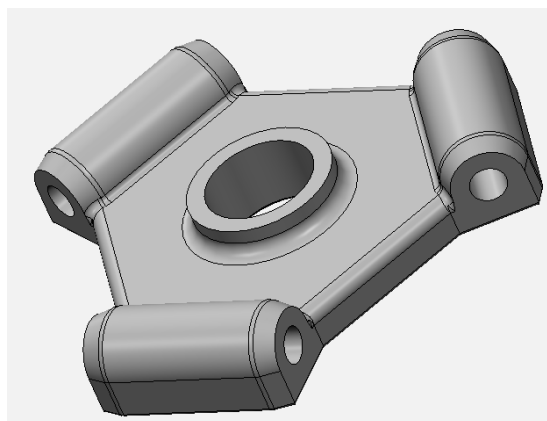
Obrázek 5-12: Dolní díl horního ramene

Tvarově součást vychází z horního dílu horního ramene a otvory pro trubky jsou ve všech ohledech stejné. Liší se tím, že je součást symetrická i podle roviny procházející trubkami a tím, že místo osy unašeče jsou přichystány výstupky s otvory na závit kulových kloubů.

V rámci dodatečných úprav bylo provedeno převrtání otvorů na trubky stejně jako u horního dílu, a rovněž vyříznutí závitů v na to vytvořeném otvoru. Ten byl vyříznut závitníkem nejprve z jedné strany a následně z druhé. Vhodnější by bylo vyříznout oba najednou jako jeden závit maticovým závitníkem, ale ani postupné vyříznutí nezpůsobilo žádné následné problémy.

Při montáži se neobjevily žádné problémy a ani k tomuto dílu nejsou žádná další doporučení, mimo těch již zmíněných.

Dolní plošina



Obrázek 5-13: Dolní plošina

Jedná se o jeden z klíčových a tvarově nejsložitějších dílů robotu. Plošina je tvořena trojúhelníkovou deskou s válečky s otvory na závit ve svých vrcholech (případně z jiného úhlu pohledu šestiúhelníkem s válečky na třech hranách). Deska má průměr 6mm a válečky 12mm, přičemž ty svou velikostí i tvarem kopírují válcové výstupky na dolním dílu horního ramene. Válečky jsou posunuty tak, že jejich osa leží na dolní rovině desky plošiny a celá horní rovina plošiny je plochá. Zajímavostí je, že prakticky identické řešení je použito na robotech ABB IRB360, ačkoliv jde pouze o náhodu, případně evoluční konvergenci.

Uprostřed plošiny je otvor o průměru 15mm a na spodní straně plošiny je okolo otvoru lem, který v daném místě zvedá tloušťku desky na 10mm. Tento otvor je určený k montáži efektoru a slouží zároveň jako kluzné pouzdro. Průměr otvoru byl kompenzován o nepřesnost tisku.

Na horní rovinu plošiny patří dva držáky serv efektoru. Pro zjednodušení výroby však byly vyrobeny samostatně a teprve dodatečně nalepeny. Pro určení polohy byly v plošině vytvořeny malé otvory a na držácích malé výstupky, které zajistily určení polohy držáků.

Plošina si jako dodatečné úpravy vyžádala vyříznutí závitů do připravených otvorů, postup se shoduje se závity dolního dílu horního ramene. Další úpravou je alespoň částečné vybroušení vnitřního průměru středního otvoru pro zarovnání největších nerovností. Technologie tisku způsobuje na kulatém povrchu v jednom místě šev, který pak brání ve volném otáčení efektoru. Pro vyřešení bylo nutné šev ubrousit.

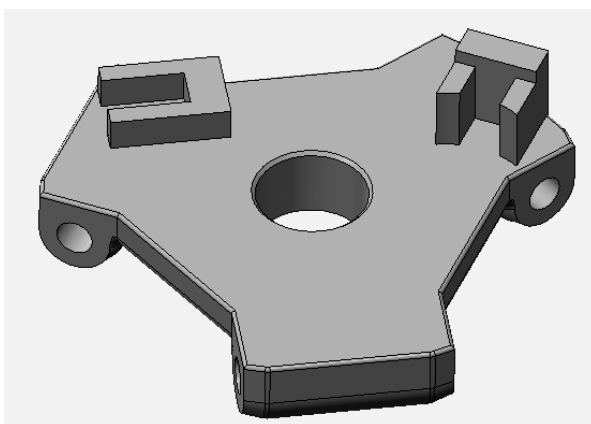
Při montáži se vyskytlo několik problémů. Asi nejzávažnějším bylo prasknutí jednoho z válečků se závitěm. Došlo k tomu při dotahování jednoho z čepů kulových kloubů a pravděpodobnou příčinou bylo přílišné pnutí uprostřed válečku vlivem nedokonale vyříznutého závitu a zároveň pnutí na okraji když válcová část čepu už bez závitu byla vtažena do závitu. Prasklina naštěstí díl nezneškodila a později byla úspěšně zalepena epoxidovým lepidlem UHU plus 300kg. Nicméně

její vznik potvrdil náchylnost materiálu k praskání a zároveň vedla k okamžitému preventivnímu kroku v podobě povolení všech ostatních čepů a následném utahování jen minimální silou.

Další problém byl se švem v otvoru, ale ten již byl popsán.

Do budoucna k této části nejsou zásadní doporučení.

Držáky serv efektoru



Obrázek 5-14: Držáky serv efektoru

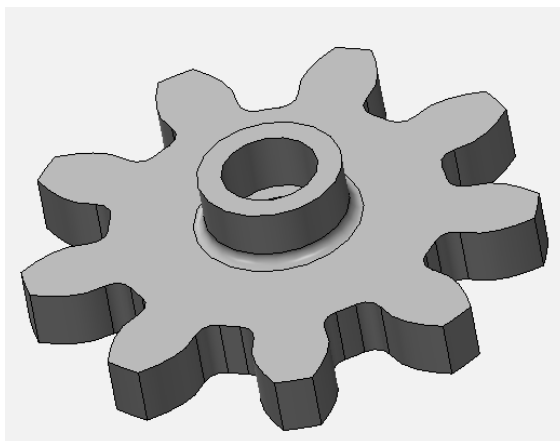
Jde o dva díly tvaru U, které patří na horní stranu dolní plošiny. Na držáky serv se následně montují serva pro otáčení a otvírání efektoru. Nižší rovný držák patří k vertikálně umístěnému servu, ovládajícímu otvírání čelistí. Vyšší držák s výstupkem bude držet horizontální servo otáčející efektozem.

S držákem vertikálního serva nebyly žádné problémy. Šlo snadno přilepit na určenou pozici a připevnit na něj servo. Naopak s držákem horizontálního serva se projevily hned dva problémy. Jedním z nich jsou nedostatečně velké výstupky pro určení polohy na dolní plošině. Díl byl v tiskárně jinak orientován, což způsobilo, že i přes stejné rozměry jako na vertikálním držáku jsou na horizontálním držáku výstupky téměř nepoužitelné. Druhý problém byl chybný tvar držáku. Model serva v počítači se proti skutečnému servu lišil v poloze přírub o několik milimetrů, tím pádem servo nebylo možné na držák upevnit.

Řešením prvního problému bylo nalepení držáku bez pomoci výstupků. Přestože to bylo pracnější než u prvního držáku, nebylo nalepení držáku do správné polohy větší problém. Druhý problém byl vyřešen improvizovaně domodelováním nalepením plastových destiček.

Do budoucna je pouze zapotřebí opravit tvar držáků a zvětšit výstupky pro určení polohy na plošině.

Ozubené kolo horizontálního serva

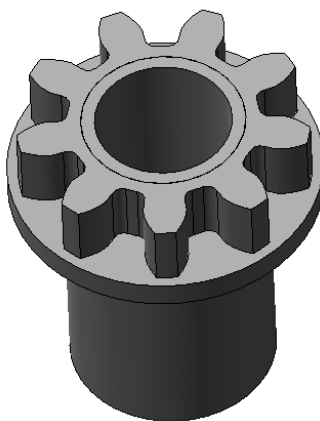


Obrázek 5-15: Ozubené kolo horizontálního serva

Jde o ozubené kolo s evolventním ozubením a poměrně krátkými zuby. Slouží k otáčení efektoru okolo svislé osy, přičemž zapadá do stejného ozubení na horní části efektoru.

Díl je tvarován tak, aby šel použít přímo místo unašeče serva. Tiskárna ale není schopná vyrobít velmi jemné ozubení tisícihranu na hřídeli serva. Proto zde byla zkušebně použita jiná metoda. Součást byla opatrně zahřátá na teplotu okolo 150°C, při které polykarbonát přechází do plastického stavu a při této teplotě byla do otvoru vsunuta hřídel serva. Tím se do materiálu otisknuly zuby z hřídele a došlo ke spojení dílů. S procesem se spojovaly dvě obavy. Jednou byla obava z prasknutí dílu vlivem pnutí, pokud by byla teplota příliš nízká. Druhá obava byla ze zdeformování dílu vlivem tepla. Naštěstí ani jedna z obav se neprojevila a spoj dílu s hřídelí se zdá být v pořádku.

Jádro efektoru



Obrázek 5-16: Jádro efektoru

Jádro efektoru je válcový díl s ozubením na horní části, zúžením ve spodní části a otvorem ose po celé délce. V horní části je otvor široký a představuje prostor pro pružinu, ve spodní části naopak úzký, přesně na průměr táhla.

Ozubená horní část je v kontaktu s ozubeným kolem serva a otáčí celý efektor okolo svislé osy. Kolo má 9 zubů s modulem 2 na roztečné kružnici o průměru 18mm. Rozměrově ozubená část

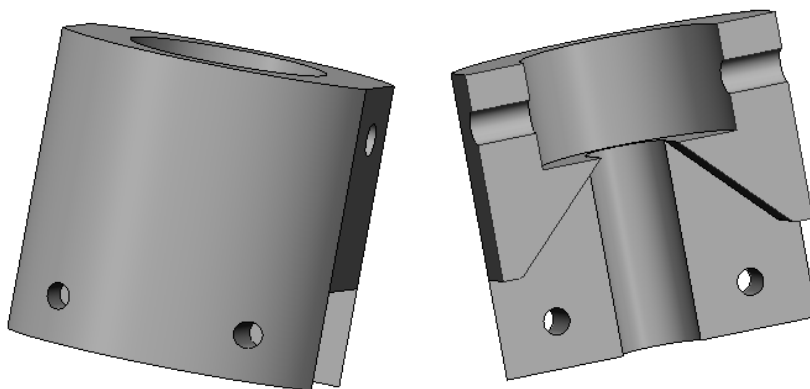
odpovídá ozubení kola serva. Převodový poměr mezi nimi je 1:1 a slouží pouze k prostorovému posunu osy serva.

Spodní zúžená část jádra pasuje do otvoru v dolní plošině a působí v něm jako hřídel v kluzném pouzdru.

Před montáží bylo nutné na dílu zbrousit šev na válcové části, stejně jako u plošiny. Bez něj jádro drhlo a v některých úsecích i zadržovalo. Po zbroušení je pohyb hladký v celém rozsahu. Druhá úprava se týkala otvoru pro táhlo efektoru. Při průměru 2mm už tiskárna nebyla schopná udržet rozměry ani tvar otvoru. Proto bylo nutné jej převrtat 2mm vrtákem.

Z funkčního hlediska díl naprosto splňuje svůj účel. Nicméně do budoucna by bylo vhodné přepracovat ozubení. Z obavy z nepřesnosti tiskárny byl zvolen dost vysoký modul ozubení. Ten sice nijak nepřekáží funkci, ale nevypadá esteticky. Vhodnější by bylo použít ozubení s menším modulem a vyšším počtu zubů. Neznámou je ovšem jak malé zuby je opravdu možné vyrobit.

Spodní díl efektoru



Obrázek 5-17: Spodní díl efektoru

Spodní díl efektoru má tvar profilu s eliptickým průřezem a seříznutými boky. V horní části je válcová dutina, ve spodní plochý zářez. Ve spodní části rovněž vedou napříč dva otvory pro kolíky, v horní části na bocích jsou otvory se závitem pro šrouby.

Horní dutina má průměr shodný se zúženou částí jádra efektoru a při montáži na ni patří. Vzájemně jsou tyto části spojeny dvěma šrouby M3 z boků. Na rozdíl od jádra se na spodní plošinu tento díl montuje zespodu, takže po spojení s jádrem efektoru jsou tyto části zafixovány proti vysunutí.

Spodní zářez šířkou odpovídá šířce čelistí, které se v něm pohybují. Tvar zářezu je volen tak, aby v žádaném rozsahu pohybů čelisti nijak neblokoval. Skrz otvor pro čelisti a skrz čelisti samotné vedou po montáži dva ocelové kolíky, které slouží jako jezdcí kulisy efektoru.

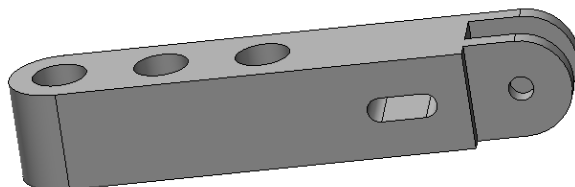
Před montáží bylo stejně jako u jádra nutné provrtat malé otvory pro kolíky. Další úpravy nebyly zapotřebí.

Problémy se ale ukázaly s rozměry. Tato část nebyla kompenzována pro rozměrovou nepřesnost tisku a výsledkem bylo, že čelisti do zářezu pasovaly jen opravdu velmi ztuhla. Řešením by bylo

zbroušení materiálu, ale kvůli tvarové složitosti to je u tohoto dílu nepraktické. Oprava byla provedena pouze u dílů čelistí. Po zbroušení se čelisti v dílu pohybují zcela hladce.

Žádoucí úprava do budoucna se týká pouze kompenzace rozměrů, aby se předešlo broušení.

Čelist



Obrázek 5-18: Čelist efektoru

Čelist efektoru je drobný plastový díl ve tvaru hranolu se zakulacenými konci. Na jednom svém konci má výřezy s otvorem pro osu táhla, na druhé straně jsou tři otvory skrz čelist. Uprostřed délky je v čelisti podlouhlý otvor kulisy.

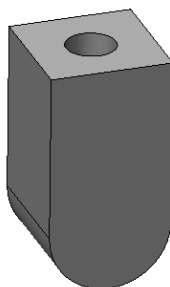
Čelist je v efektoru ve dvou kusech. Obě svými zářezy do sebe zapadají a po spojení osou táhla tvoří rotační kloub (pant). Tvar byl upraven tak, aby byly obě čelisti shodné, v zájmu unifikace výroby.

Tři otvory na opačném konci slouží pro šrouby upevňující prsty čelistí. Tři jsou zde přítomny v zájmu modularity. Prst může být ve třech různých vzdálenostech a tak uchopovat různě velké objekty. Navíc je do otvorů možné uchytnout i jiný tvar prstu nebo rovnou nějaký nástroj. Průměr otvorů je určen pro šrouby velikosti M4.

Úpravy dílu spočívaly jednak v převrtání drobných otvorů, včetně otvoru kulisy, ale především ve výrazném zbroušení boků dílů. Bylo zapotřebí odebrat několik desetin materiálu z obou stran. Problém přitom představovala skutečnost, že bylo nutné brousit i malé plošky pantů. V opačném případě by díly po montáži nemohly být osově vyrovnané a navzájem by se tlačily do stěn spodního dílu efektoru. Naštěstí se tyto úpravy obešly bez poškození dílů.

Potřebné úpravy do budoucna spočívají v kompenzaci broušení. Rovněž je vhodné zvážit, jestli zachovat koncept čelistí jako dvou shodných dílů, nebo jestli pant dělat v podobě vnitřních a vnějších pantů. Při současné koncepci totiž mají čelisti tendenci se od sebe odtlačovat.

Prst efektoru



Obrázek 5-19: Prst efektoru

Prst je naprosto jednoduchá hranolovitá součást. Jediným prvkem ke kterému se má smysl zmínit je otvor se závitem v horní části, do kterého se šroubuje šroub M4 spojující jej s čelistí.

Funkcí prstu je úchop objektů manipulace. Původně měl být nedílnou součástí čelistí, ale s ohledem na modulárnost a vyměnitelnost byl osamostatněn.

Táhlo efektoru



Obrázek 5-20: Táhlo efektoru

Táhlo efektoru je přechodem mezi tištěnými a netištěnými díly. Podle původního návrhu mělo být vyrobeno z ohýbaného ocelového drátu, nicméně po seznámení se s možnostmi tisku bylo rozhodnuto o jeho zkušební výrobě 3D tiskem. Bohužel zde se ale technologie neosvědčila a tak bylo v konečné podobě táhlo vyrobeno z kovu.

Konstrukčně je táhlo dlouhý 2mm tenký válec s okem na konci. V oku je otvor na čep, spojující táhlo s čelistmi efektoru. Na druhém konci táhla je závit M2, na který patří matice držící pružinu na místě a přes kterou tlačí servo na táhlo. U plastového dílu byl závit „vyříznut“ přímo maticí, u kovového byl závit již přítomen na polotovaru.

Problémy s tištěným dílem se objevily ihned po výrobě. Táhlo bylo tisknuto na plocho, což ale způsobilo, že jeho průřez měl spíše eliptický tvar než kulatý. Tak malý průměr prakticky nebylo možné zbrousit do kulata, takže byl místo toho tvor v jádru efektoru převrtán mírně větším vrtákem, tak, aby se táhlo do otvoru vešlo. Tím ale trochu vznikl problém s vedením, protože táhlo nebylo v otvoru dostatečně těsně a mělo tendenci se naklánět.

Dalším problémem byla vysoká pružnost dílu. Díky ní se stávalo, že po zatlačení na táhlo se místo jeho pohybu směrem dolů prostě ohnulo do strany. To je samozřejmě nežádoucí, protože nedocházelo ke spolehlivému otevírání čelistí.

Vrcholným problémem bylo prasknutí táhla. K prvnímu prasknutí došlo samovolně, zřejmě vlivem dlouhodobého zatížení od předepjaté pružiny. K prasknutí došlo v oblasti matice, takže pravděpodobný podíl měly i občasné neúmyslné ohyby táhla a poškození povrchu závitem. Protože se utrhla pouze konec táhla, byl proveden pokus o opravu. Při něm však táhlo prasklo podruhé, tentokrát hned u oka. Na základě toho bylo použití tištěného táhla označeno za nevhodné a přistoupilo se k výrobě kovového táhla.



Obrázek 5-21: Kovové táhlo efektoru

Proti původnímu návrhu není kovové táhlo vyrobeno ohýbáním z drátu ale pájením. Základem je ocelový drát, na jehož konec byla připájena smyčka z měděného drátu. Výsledný výrobek po očištění a vybroušení je na obrázku (Obrázek 5-21), doplněný o pružinu a matici.

S kovovým táhlem efektoru se neobjevily žádné další problémy. Problémy plastového dílu souvisí s nevhodností technologie pro daný díl. Protože ale šlo o experiment se záměrem zjištění vhodnosti, nelze tento čas považovat za ztracený. Naopak, jde o jeden z vedlejších výstupů práce.

5.3.2 Netištěné díly

Hliníkové profily:

Profily tvoří základní část nosného rámu robotu. Použit je profil společnosti ITEM velikosti 5 o průřezu 20x20mm. Použito je celkem 6 kusů profilů ve dvou délkách. Vodorovné profily v délce 290mm a svislé o délce 440mm.

Výrobce nabízí k profilům velké množství příslušenství, včetně specializovaných spojovacích materiálů. Z cenových důvodů však byla no spojování profilů použita levnější alternativa v podobě čtvercových matic M5 a běžných metrických šroubů M5.

Profily byly objednány u společnosti Haberkorn Ulmer, českého distributora společnosti ITEM.

Plexisklové kryty

Plexisklové kryty jsou tvořeny pásem litého plexiskla o síle 4mm, ve zhruba 2/5 délky ohnutý o 90° a s koncem seříznutým do špičky v úhlu 120°. Na jedné straně se nachází tři otvory pro šrouby se zapuštěnou hlavou.

Kryty jsou rozměrově navrženy tak, aby kopírovaly po vnější straně hliníkové profily. Seříznuté konce by se měly setkat ve středu robotu a vytvořit optickou návaznost.

Původní úvahy počítaly s ruční výrobou krytů. Z převážně estetických důvodů však tato práce nakonec byla svěřena firmě s patřičným vybavením a zkušeností. Jednalo se o společnost MK Plexi.

Nevýhoda ohýbaného krytu je přítomnost vnitřního radiusu v ohybu. Dle výrobce je minimální hodnota cca 2-3mm (která odpovídá dodaným krytům). Jako alternativu sám výrobce navrhl kryt řešit ze dvou lepených a následně vybroušených a zaleštěných desek, kde by byla přítomná ostrá hrana. Z pevnostních důvodů ale byla zvolena původní ohýbaná verze. To si následně vyžádalo drobnou úpravu nosného rámu, kdy musely být pomocí brusného papíru zabroušeny hrany hliníkových profilů, které jsou v kontaktu s radiusem krytů.

Hlavní serva – Hyperion Atlas DS20-UMD



Obrázek 5-22: Servo Hyperion Atlas DS20 UMD

Ve finální konstrukci nakonec byl použit jiný typ serv, než který proběhl původními testy. Důvodem je sjednocení napájecího napětí v rámci celého robotu na 5V. Použité servo ale má téměř identické parametry jako servo dříve zkoušené. Pouze se jedná o starší řadu výrobce.

	HP-DS20-UMD
Typ serva	Plně programovatelné servo na standardní napájecí napětí
Rozměry mm	40.0 x 19.5 x 37.8
Hmotnost gram	53
Rychlost (sec/60 deg @ 4.8/6V)	0.23/0.18
Dynamický moment (kg/cm @ 6.0/7.4V)	11.6/13.8
Přidržený moment (kg/cm @ 6.0/7.4V)	20.9/23.5
Materiál hlavního převodu	kov
Ložiska	Dvě kuličková
Programovatelnost	Ano
Úhel rotace	Nastavitelný od 30 do 140 stupňů, výrobní nast. 90 st.
Rozsah nastavení rychlosti	Ano, 1% až 100% normální rychlosti (výr. nastavení 100%)
Max. vstupní napětí	6,25V pod zátěží

Tabulka 6: Parametry serva DS20 UMD

Z provozního hlediska mezi servy není rozdíl. Serva DS20 jsou navíc o něco levnější.

Serva efektoru - Nexus DSW 312MG



Obrázek 5-23: Servo Nexus DSW 312MG

Stejně jako u hlavních serv se jedná o digitální modelářské servo. Je však z podstatně menší velikostní kategorie. Na rozdíl od serv Hyperion Atlas nejdou serva Nexus programovat, ale v roli pohonu efektoru to tolik nevadí. Stejně jako hlavní serva je určeno pro provoz na 5V

	Nexus DSW 312MG
Typ serva	Miniaturní digitální servo
Rozměry mm	23.0 x 11.4 x 25.1
Hmotnost gram	10.7
Rychlost (sec/60 deg @ 4.8/6V)	0.14/0.11
Krouticí moment (kg/cm @ 6.0/7.4V)	1.9/2.2
Materiál hlavního převodu	kov
Ložiska	Jedno kuličkové kuličková

Kulové klouby



Obrázek 5-24: Kulové klouby Igus WGRM

Součástí konstrukce ramen robotu je dohromady 12 kulových kloubů, aby součástí paralelogramů. Klouby představují důležitou část robotu z hlediska přesnosti, ale také dosahu. Každý kulový kloub je totiž omezen svým maximálním natočením. Nevýhodou kulových kloubů je ale cena, která obzvlášť roste s rozsahem s natočení. Proto bylo ve fázi počítačového modelu maximální natočení kloubů důsledně sledováno a představovalo jedno z největších omezení velikosti pracovního prostoru.

Maximální natočení bylo i jedním z důvodů proč byl pracovní prostor omezen ze skutečně maximálního na válcový praktický. Analýzou bylo zjištěno, že pro body v něm ležící nepřekračuje natočení kloubů hodnoty 30°. To umožnilo použít jednodušší a hlavně levnější klouby.

Zvolený typ kloubů jsou nízkonákladové kulové klouby Igus WGRM-6 LC. Každý tento kloub se skládá pouze ze dvou plastových dílů – čepu a pouzdra, které se do sebe zacvaknou. Výrobce doporučené natočení je sice pouze 18°, nicméně vzhledem k minimálnímu zatížení je možné tuto hodnotu na robotu překročit a jít až na maximální hodnotu natočení.

Co se týče montáže, čepy nevyžadovaly žádnou úpravu. V souladu s návodem výrobce byly zašroubovány do k tomu určených závitů v tištěných dílech. Pouzdra však měla být připojena na uhlíkové trubky, do kterých vyřezat závit není možné. Proto byla provedena úprava, spočívající v odvrtání závitu vrtákem o průměru 6mm. Do tohoto otvoru pak byla vložena a zalepena uhlíková trubka.

Klouby byly objednány u společnosti Hennlich, dodavatele výrobků společnosti Igus na český trh.

Uhlíkové trubky

Uhlíkové trubky jsou na robotu použity jako nosná část ramen. Hlavním požadavkem je zde vysoká tuhost a nízká hmotnost. Protože v obou parametrech uhlíkové trubky excelují, stalo se jejich použití jasnou volbou. V ranných fázích návrhu se uvažovalo i nad použitím hliníku, ale hliníkové trubky by při stejných rozměrech byly těžší a méně tuhé.

Na robotu jsou použity trubky o vnějším průměru 6mm a vnitřním 4mm. Přibližné délky použitých trubek jsou 170mm u horní části ramen (6ks) a 270mm u dolních částí ramen (6ks). Dodávají se v délkách po 1 metru, takže na výrobu ramen byly zapotřebí tři metrové tyče.

Trubky jsou od společnosti Exel composites a používají se například v rádiem řízených modelech. Dostupné jsou v modelářských obchodech.

6 Řízení robotu

V rámci řízení robotu je zapotřebí vyřešit zdroj řídicího signálu serv v hardware rovině, sestavit inverzní úlohu pro řízení robotu a sestavit řídicí program. Zároveň je zapotřebí vyřešit vzájemnou komunikaci všech částí systému.

6.1 Hardware

Hardware znamená zdroj řídicích signálů pro serva, počítač dostatečně výkonný pro výpočet inverzní úlohy a vzájemný komunikační prostředek.

První návrhy řídicího systému počítaly s využitím univerzálního kontroléru Arduino, postaveném na mikroprocesoru ATmega328. Důvodem byla dostupnost kontroléru a výborné zdokumentování jeho vlastností. Pro tento kontrolér rovnou existují knihovny pro řízení serv, což by výrazně urychlilo práci.

Procesor v Arduinu není při frekvenci 16MHz dostatečně výkonný pro výpočet inverzní úlohy robotu v reálném čase. Proto tento raný návrh počítal s kooperací Arduina a stolního počítače, kde počítač by počítal inverzní úlohu a arduino by pouze jeho výsledky převádělo na řídicí signály.

Kontrolér Arduino byl použit při testu serva, přičemž splnil předpoklady jednoduchosti použití. Jenže se zároveň ukázalo, že pro řízení tak přesných serv není zcela vhodné, kvůli nedostatečně kvalitnímu signálu. Servo mělo tendenci se kmitat okolo žádané polohy, místo aby ji drželo. Pravděpodobnou příčinou je příliš složitý řídicí program, který nedokáže pracovat dostatečně efektivně. Program nahraný do kontroléru obsahuje vždy funkce pro ovládání v tu chvíli ne zrovna používaných částí procesoru. Samotná knihovna serva je navíc velmi rozsáhlá, protože je odvozená od obecných nadřazených funkcí a obsahuje tak spoustu balastu. Bez studia kódu není možné říct, jak přesně knihovna pracuje.

Kvůli nevhodnosti použití kontroléru Arduino bylo nutné hledat jiné řešení. Nabízelo se několik variant:

První variantou bylo zůstat u Arduina, ale výrazně optimalizovat kód, případně jej napsat celý od základu. Toto řešení by nutně muselo být úspěšné, ale bylo by na ně zapotřebí velké množství času a zkušeností s programováním mikrokontrolérů. Z časových důvodů by se tak jednalo o značně nejistou variantu.

Druhou variantou bylo použít mnohem silnější kontrolér na 32bit procesoru architektury ARM. Díky mnohem vyššímu výkonu procesoru by teoreticky měl kontrolér stačit generovat dostatečně přesné řídicí signály i při méně efektivním kódu. Navíc je teoreticky možné na něm počítat i inverzní úlohu, a tak vytvořit systém „vše v jednom“. Možným kandidátem na takový kontrolér jsou například kontroléry řady Netduino, využívající micro.NET frameworku.

Problémem je, že v takovéto úloze jsou 32bit kontroléry nevyzkoušené a není jisté, že by se naplnil předpoklad kvalitnějšího signálu v důsledku vyššího výkonu. Mohl by se opakovat zcela stejný scénář, ale na podstatně dražším zařízení.

Třetí varianta je podobná druhé, ale z hlediska samotného řízení představuje pohled z opačné strany. Variantou je použití minipočítače Raspberry Pi. Raspberry je sice primárně na software zaměřené vývojové zařízení, ale nicméně je vybaveno digitálními výstupy, takže by pro řízení v teorii šlo využít. Proti druhé variantě to je pohled z druhé strany, protože Raspberry je vybaveno plnohodnotným operačním systémem, který zjednodušuje řízení hardware. Do určité míry ale

platí to samé jako v druhé variantě. Pro tento účel jde o neodzkoušené zařízení a je u něj nejistý výsledek. Velkou neznámou je navíc přítomnost operačního systému a jeho chování.

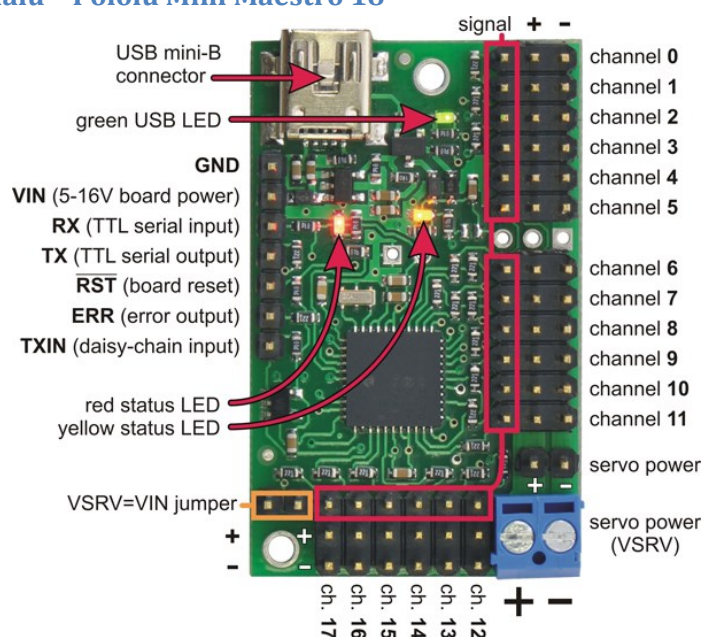
Naštěstí se ale objevila ještě čtvrtá, následně vítězná varianta.

Kromě univerzálních kontrolérů se na trhu v menším množství vyskytují i specializované kontroléry, maximálně zjednodušené a optimalizované pro jeden účel. Přesně takovým zařízením je kontrolér Pololu Maestro. Ve své podstatě jde o zařízení příbuzné Arduino, ale je ořezáno o téměř vše, co nesouvisí s ovládáním modelářských serv. Není možné ani plnohodnotně programovat, respektive programovací jazyk v nich je silně omezený, a bez možnosti rozšíření knihovnamí.

Naopak katalogové předpoklady pro řízení serv jsou výborné. Výrobce v dokumentaci slibuje přesnost řídicích pulzů na čtvrtiny mikrosekund a to až při frekvenci 333Hz (tzn. poloha je servům posílána více než šestkrát častěji). Počet serv, které je možné ovládat záleží na konkrétním typu kontroléru a na jeho nastavení. Při ceně kolem tisíce korun za jednotku šlo v dané situaci o nejlepší volbu.

Kontrolér pracuje ve spolupráci s počítačem, na kterém poběží řídicí software a výpočet inverzní úlohy.

6.1.1 Zdroj signálu – Pololu Mini Maestro 18



Obrázek 6-1: Mini Maestro 18

Pro vyzkoušení a následné řízení robotu byl zakoupen kontrolér Mini Maestro 18. Jedná se o zařízení schopné ovládat až 18 serv najednou, nebo libovolnou kombinaci serv a digitálních vstupů/výstupů. Počtem výstupů je zařízení předimenzované a dostačovala by i menší verze Mini Maestro 12, ale tato v době objednání nebyla k dispozici a nebyl znám datum naskladnění.

Tabulka hlavních parametrů:

	Pololu Mini Maestro 18
Rozlišení délky pulzu	0,25 μ s
Rozsah délek pulzů	64-4080 μ s
Rozsah frekvencí pulzů	1-333 Hz
Velikost vnitřní paměti	8 kB
Počet ovládaných serv	18
Analogový/digitální vstup	12/18
Univerzální digitální výstup	18
PWM výstup	1, PWM frekvence 2,93kHz – 12 MHz. 10bit rozlišení
Možnosti komunikace	USB, TTL (5V) sériová linka
Napájecí napětí	5-16V
Hmotnost	4,9g
Rozměry	28mm x 46mm

Obrázek 6-2: Parametry Pololu Maestro 18

Pro frekvenci a rozsah délek pulzů dále platí omezení podle počtu zapojených serv a nastavení. Pro 5 běžných serv však omezení nejsou podstatná.

V tabulce je uvedeno několik parametrů, které si zaslouží vysvětlení. Je zde uváděna velikost paměti. Do kontroléru je možné pomocí skriptovacího jazyka uložit sekvenci pohybů, ale třeba i velmi omezenou inteligenci robotu. Omezením jsou možnosti skriptovacího jazyka a právě dostupná paměť. Dále se v tabulce uvádí počet analogových a digitálních vstupů/výstupů. Ty sdílí konektor se servy a tak je možné je použít jen pokud na daném portu není nic zapojeno. Využití může být třeba pro spínač. Pro podrobnější přehled možností kontroléru je vhodné nastudovat návod výrobce [1].

Pro účely práce je zajímavý řádek věnující se komunikaci. Pokud kontrolér nepřehrává sekvenci ze své paměti, spoléhá se na příkazy z nadřazeného počítače. S ním je možné ji propojit buď USB rozhraním (které umožňuje i kontrolér nastavovat) a přes sériové rozhraní s 5V logikou. V návodu je dále popsáno, že přes USB rozhraní je kontrolér možné ovládat přes vlastní komunikační protokol, nebo přes virtuální sériový port. Všechny tyto možnosti komunikace byly zachovány i po začlenění kontroléru do robotu. Jako primární komunikační rozhraní je určena sériová linka připojená na bluetooth modul (viz níže), ale je možné robot připojit i pomocí rozhraní USB.

6.1.2 Bluetooth modul HC-06



Obrázek 6-3: Bluetooth modul HC-06

Modul HC06 je bluetooth převodník ze sériové linky založený na čipu BC417. Jeho použití je extrémně jednoduché, protože jej stačí připojit na sériovou linku a modul bude veškerou komunikaci přenášet pomocí SPP profilu do cílového zařízení jako by probíhala po kabelu. Cena těchto modulů je velmi nízká. Při nákupu ze zahraničí může klesnout i dost pod 10USD.

Vykoupeno je to chybějící podporou výrobce a špatně dostupnou dokumentací. Vzhledem k jednoduchosti použití a charakteru projektu to však nepředstavuje zásadní překážku.

V našem případě byl použit modul rozšířený o napěťový regulátor 5V->3,3V a konektory. Je připojen čtyřmi vodiči k Mini maestru. Dva napájecí a dva na TX/RX piny sériové linky. Po připojení napětí k Mini Maestru se aktivuje i bluetooth modul a začne hledat příchozí spojení, což signalizuje blikající LED diodou. Po připojení zůstane dioda svítit. V počítači se bluetooth spojení hlásí jako virtuální sériový port, takže z pohledu programu v počítači i Maestra v robotu probíhá spojení po kabelu.

Před prvním použitím modulu je ale nutné provést několik nastavení. To se dělá připojením na sériový port počítače a zasláním specifických příkazů. Jejich popis je v tabulce:

Příkaz	Odpověď	Význam
AT	OK	Iniciace komunikace. Pokud je komunikace v pořádku, modul odpovídá
AT+VERSION	OKlinvorV1.5	Dotaz na verzi firmware.
AT+NAMExxx	OKsetname	Nastavuje jméno, pod kterým se bude modul hlásit jiným zařízením. Místo xxx patří do příkazu jméno
AT+PINxxxx	OKsetPIN	Nastavuje pin potřebný k navázání spojení ze zařízení. Místo xxxx patří hodnota zvoleného pinu
AT+BAUDx	OKbbbb	Nastavuje rychlost komunikace. Za x patří hexadecimální číslo v rozsahu 1 až C. Nejčastější hodnoty jsou 4 pro baudrate 9600 a 8 pro 115200. Zbýlé hodnoty je možné nalézt na [29]

Obrázek 6-4: Příkazy modulu HC-06

Modul byl nastaven na baudrate 115200, jméno bylo změněno na delta354 a PIN nastaven na 2013

Použití bluetooth modulu v robotu má několik výhod. Jednou z nich je úspora datové kabeláže a možnost mít počítač vzdálený od robotu. Druhou je možnost připojit robot i k jiným zařízením, například mobilním telefonům. Toto není v současné verzi podporováno, nicméně perspektivně to možné je.

6.1.3 Nastavení serv

Pro zjednodušení řízení bylo s výhodou využito možnosti naprogramovat parametry serv. Postup nastavování parametrů pomocí programu ServoCommand byl zmíněn v kapitole 3.3.5. Nejprve byl nastaven rozsah natočení serv. Žádané plné natočení je 90° a pro co největší přesnost je vhodné k tomu využít co největší rozsah délek řídicích pulzů. Praktickou zkouškou bylo zjištěno, že serva reagují na změnu hodnot v rozsahu 700-2300μs. Hodnota zobrazovaná v programu ServoCommand ale odpovídá rozsahu pouze 1000-2000μs. Proto hodnota zadaná do programu není 90°, ale 57°. Plný rozsah tak odpovídá úhlu těsně přes 90°.

Druhý parametr který byl měněn byla střední poloha, za účelem zkalkulování natočení serv. Z výrobních důvodů není natočení našech při výchozím nastavení zcela stejné, ale může se lišit o jednotky stupňů. To ale u paralelního robotu je nežádoucí. Proto byly měněny hodnoty střední polohy serva dokud nebylo dosaženo u všech serv stejné krajní polohy. Použité hodnoty jsou - 34μs, 51μs a 118μs. V případě výměny serv by ale bylo nutné kalibraci provést znovu. Hodnoty záleží na každém jednotlivém servu.

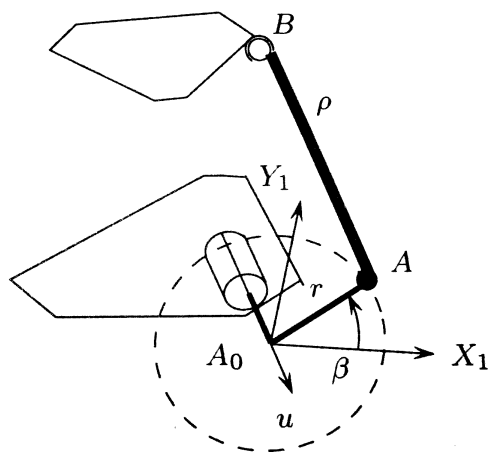
Díky nastavení parametrů bylo dosaženo stavu, kdy poloha všech tří serv je na stejný signál stejná a kdy maximální rozsah přibližně odpovídá žádanému maximálnímu rozsahu. Protože jsou parametry uloženy přímo v servech, není nutné už rozdíly mezi servy nijak zohledňovat v řídicím programu.

6.2 Inverzní úloha

Inverzní úloha kinematiky je matematickou úlohou, snažíci se najít vstupní kloubové proměnné pro pracovní bod mechanismu ve zvoleném bodu pracovního prostoru. V našem případě chceme najít funkci, jejímž výstupem pro libovolný bod v pracovním prostoru jsou úhly natočení serv.

Obecně u sériových robotů bývá inverzní úloha považována za velmi složitou. Naštěstí toto neplatí pro paralelní roboty. Delta robot kterým se práce zabývá má sice tři ramena a bod v prostoru určují pouze dohromady, ale je-li bod již určen, stačí se zabývat pouze jedním velmi jednoduchým ramenem.

Inverzní úloha delta robotu a její vytvoření je detailně popsána v [1], nicméně výpočty v knize uvedené obsahují chybu. Proto zde bude princip úlohy stručně popsán a rovnice uvedené ve zdroji znovu sestaveny.



Obrázek 6-5: Parametry inverzní úlohy

Inverzní úloha ve své podstatě představuje hledání průniku kružnice opsané horním ramenem okolo bodu A_0 , a kulové plochy opsané spodním ramenem okolo známého bodu B . Hledanou veličinou je úhel β natočení horního ramene tak, aby koncový bod dosáhl průsečíku.

Znáмыми vstupními hodnotami jsou souřadnice bodů A_0 a B , a délky ramen r a p . V prvním kroku výpočtu sestavíme funkci pro výpočet vektoru $\mathbf{A_0A}$ s proměnnou β

$$\overline{A_0A} = r(\cos(\beta) \overline{X_1} + \sin(\beta) \overline{Y_1}) \quad (6.1)$$

Vektory $\mathbf{X_1}$ a $\mathbf{Y_1}$ jsou jednotkové vektory, kolmé k ose otáčení u . Protože vektor $\mathbf{A_0A}$ a $\mathbf{A_0B}$ jsou známy, je možné dopočítat zbývající vektor \mathbf{AB} .

$$\overline{AB} = \overline{A_0B} - r(\cos(\beta) \overline{X_1} + \sin(\beta) \overline{Y_1}) \quad (6.2)$$

Souřadnice vektoru \mathbf{AB} jsou bez znalosti úhlu β neznámé. Přesto však známe velikost tohoto vektoru, který je roven délce dolního ramene p . Proto rovnici přepíšeme do podoby kvadratické normy vektoru \mathbf{AB}

$$\|\overline{AB}\|^2 = \rho^2 = \|\overline{A_0B}\|^2 - 2r \cdot \cos(\beta) \cdot \overline{A_0B} \cdot \overline{X_1} - 2r \cdot \sin(\beta) \cdot \overline{A_0B} \cdot \overline{Y_1} + r^2 \quad (6.3)$$

Tím efektivně z rovnice vypadly všechny vektorové hodnoty. Kvadratická norma vektoru je vyjádřena skalárem a výsledkem skalárního součinu vektoru $\overline{A_0B}$ s jednotkovými vektory jsou opět skaláry. Praktický význam těchto součinů lze chápat jako souřadnice bodu B vůči bodu A v ose x a v ose y.

Pro další výpočet zavedeme substituci:

$$x = \tan \frac{\beta}{2}; \sin \beta = \frac{2x}{x^2 + 1}, \cos \beta = \frac{1 - x^2}{x^2 + 1} \quad (6.4)$$

A pro zřehlednění rovněž:

$$Y = \|\overline{A_0B}\|^2 - \rho^2 + r^2 \quad (6.5)$$

Rovnici je pak možné přepsat do tohoto tvaru:

$$x^2 \cdot (-Y - 2r \cdot \overline{A_0B} \cdot \overline{X_1}) + x \cdot (4r \cdot \overline{A_0B} \cdot \overline{Y_1}) - Y + 2r \cdot \overline{A_0B} \cdot \overline{X_1} = 0 \quad (6.6)$$

Jedná se o kvadratickou rovnici. Jejím řešením jsou obvykle dva kořeny, které představují dva úhly natočení ramene, ve kterých je možné bodu dosáhnout. Proměnnými rovnice jsou pouze délky ramen a poloha bodu B vůči bodu A_0

Tímto bylo nalezeno obecné řešení inverzní úlohy pro ramena delta robotu. Důležité je poznamenat, že toto řešení pracuje se souřadným systémem v ose otáčení ramene a předpokládá umístění koncového bodu do spoje dolní části ramene se spodní plošinou. V praxi tomu tak ale není. Proto je nutné ještě pamatovat na přepočty souřadných systémů bodů.

Výpočet byl průběžně ověřován v programu MathCAD a porovnáván s polohou mechanismu v programu Creo. Tím byla ověřena správnost postupu i prakticky.

6.3 Software

Se sestaveným řídicím hardware a matematicky vyřešenou inverzní úlohou je možné vytvořit řídicí software a postupně tím dojít k oživení robotu.

6.3.1 Obecný princip programu

Po řídicím programu běžícím v počítači jsou obecně požadovány čtyři postupné kroky. Jsou to

- Získání žádané polohy
- Přepočet na úhly natočení ramen pomocí inverzní úlohy
- Přepočet úhlů na vstupní hodnotu serv/tvorba komunikačního řetězce
- Odeslání dat kontroléru

Získání žádané polohy může představovat ruční vstup uživatele, ale také vstup ze souboru nebo výpočet souřadnic parametricky zadaných křivek.

Přepočet na úhly natočení ramen podle vytvořené inverzní úlohy je relativně jednoduchý. Pouze je důležitá správná algoritmizace úlohy a dostatečná efektivita výpočtu, aby mohl běžet v reálném čase.

Ve třetím kroku je výstupy nutné dále převést. Kontrolér totiž neví, čemu odpovídají úhly natočení ramen. Navíc má přesně předepsaný způsob komunikace pomocí datového řetězce, a pokud ten není dodržen, data vůbec nepřijme. V tomto kroku mimo jiné mohou probíhat i další úpravy dat. Například mohou být provedeny korekce polohy, nebo limitace pohybu.

Jestliže předchozí kroky proběhly v pořádku, je ten zbývajících už jednoduchý. Jeho podstatou je předání vypočtených dat na určité místo určitým způsobem tak, aby s nimi zbytek systému dokázal pracovat. V případě stolního počítače to znamená odeslání dat na určitý sériový port při určité rychlosti.

Posloupnost těchto čtyř kroků může být buď otevřená, spouštěná pouze na popud uživatele, nebo uzavřená, běžící v neustálé smyčce. Oba způsoby byly na zkušebním programu vyzkoušeny. U programu běžícího ve smyčce je nutné věnovat péči optimalizaci běhu, kvůli co nejhladšímu a nejrychlejšímu běhu.

V rámci obecného popisu ještě ve stručnosti popíšeme komunikaci se servo kontrolérem. Detailní popis je uveden v [28]

Kontrolér Pololu Maestro dokáže po sériové lince přijmout několik přesně strukturovaných příkazů. Nejdůležitějšími jsou příkazy pro změnu polohy serv. To je možné provést buď po jednom konvenčním protokolem, kdy je v jednom komunikačním řetězci poslána poloha vždy jen jednoho serva, nebo zjednodušeným protokolem, kdy je taktéž posílána jen poloha jednoho serva, ale kratším paketem dat. A nebo je možné posílat v rámci jednoho řetězce polohu hned několika serv najednou. Protože většinu času potřebujeme měnit polohu hned několika serv najednou, budeme využívat poslední možnosti.

Komunikační řetězec je sekvence po sobě jdoucích bajtů a vypadá takto:

0x9F, počet serv, číslo kanálu prvního serva, nižší bity prvního serva, vyšší bity prvního serva , nižší bity druhého serva, vyšší bity druhého serva, ...

Pro sestavení řetězce je dále důležité vědět dvě věci. První z nich je, že jednotlivé komunikační bajty jsou pouze 7-bitové. Osmý bit signalizuje začátek nového řetězce. U následných bajtů musí být nejvyšší bit vždy nulový. Druhá informace je, že poloha serva je zadávána ve dvou bajtech, přičemž nejprve se posílá nižších 7 bitů a teprve pak vyšších 7 bitů.

Příkladem sestaveného řetězce by mohl být tento:

0x9F, 0x02, 0x03, 0x00, 0x00, 0x70, 0x2E

Jeho význam je po bajtech: První bajt oznamuje, že bude zaslána poloha několika serv současně. Tímto bajtem začíná paket, takže nejvyšší bit je 1. Druhý bajt oznamuje, že bude měněna poloha dvou serv a třetí bajt říká, že první měněné servo je na kanálu 3. Další dva bajty říkají, že servo na kanálu 3 se má natočit do polohy 0. To v praxi znamená vpnutí řídicího signálu pro dané servo. Poslední dvojice bajtů říká, že následující servo (to znamená to na kanálu 4) se má natočit do polohy 6000. Hodnota polohy reprezentuje vždy čtyřnásobek žádané délky pulzu v μ s. Čtyřnásobek kvůli rozlišení kontroléru na čtvrtiny mikrosekund.

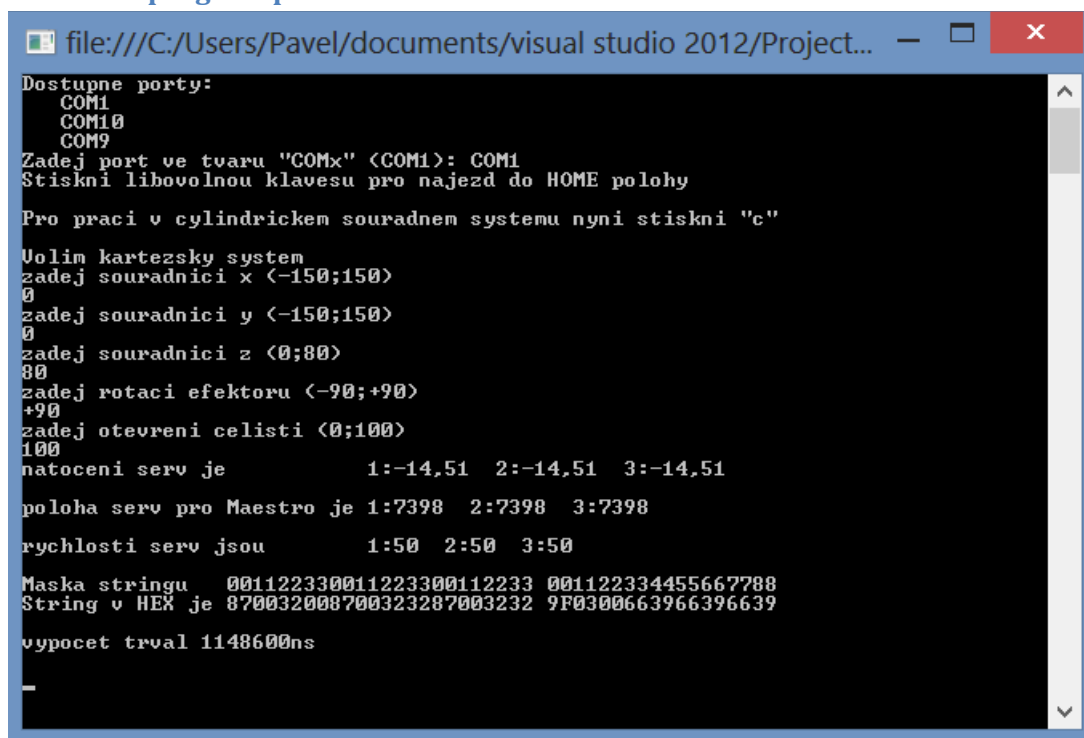
Druhým využívaným řetězcem je příkaz pro nastavení rychlosti serva. Ten vypadá takto:

0x87, číslo kanálu serva, nižší bajt rychlosti, vyšší bajt rychlosti

Význam bajtů je stejný jako u předchozího příkazu. Rychlost představuje maximální rychlostní limit a znamená násobky 0,25 μ s/10ms. Čili maximální povolená změna délky pulzu je x čtvrtin mikrosekundy za 10ms (každé μ s délky pulzu přísluší určitý úhel natočení serva. Jednotka tak efektivně nereprezentuje čas, ale velikost úhlu).

Podobným způsobem je možné nastavit i limit zrychlení, ale program robotu toho nevyužívá.

6.3.2 Řídicí program pro PTP řízení



```
Dostupne porty:
COM1
COM10
COM9
Zadej port ve tvaru "COMx" (COM1): COM1
Stiskni libovolnou klavesu pro najezd do HOME polohy

Pro praci v cylindrickem souradnem systemu nyní stiskni "c"

Uolim kartezsky system
zadej souradnici x (-150;150)
0
zadej souradnici y (-150;150)
0
zadej souradnici z (0;80)
80
zadej rotaci efektoru (-90;+90)
+90
zadej otevreni celisti (0;100)
100
natoceni serv je          1:-14,51  2:-14,51  3:-14,51
poloha serv pro Maestro je 1:7398  2:7398  3:7398
rychlosti serv jsou      1:50  2:50  3:50

Maska stringu  001122330011223300112233 001122334455667788
String v HEX je 870032008700323287003232 9F0300663966396639

vypocet trval 1148600ns
```

Obrázek 6-6: Okno programu PTP řízení

Zdrojový kód včetně komentářů je součástí příloh. Zde následuje spíše obecný popis funkce, popis ovládání programu a zdůvodnění některých kroků.

První funkční zkušební program byl vytvořen v programovacím jazyce C# s využitím nástroje Microsoft Visual Studio Express 2012. Jedná se o poměrně jednoduchý terminálový program, držící se striktně výše popsaných čtyř funkčních kroků. Hned po spuštění se program ptá uživatele na komunikační port po kterém bude probíhat komunikace (aby nebylo nutné jej zadávat průběžně) a poté přechází na první krok. Program čeká na uživatelské zadání pěti souřadnic pracovního prostoru. Jsou to tři souřadnice polohy, buď v kartézském nebo cylindrickém souřadném systému, souřadnice natočení efektoru a otevření čelistí. Už v této fázi si program kontroluje, zda je zadání splnitelné. Čili jestli se daný bod nachází v pracovním prostoru nebo jestli uživatel neudělal při zápisu chybu.

Pokud je zadání v pořádku, program přechází do druhého kroku, výpočtu inverzní úlohy. Ze zadaných vstupů sestaví kvadratickou rovnici a hledá její řešení. Díky kontrole platnosti bodu v prvním kroku je zajištěno, že vždy bude nalezeno právě jedno řešení. Výpočet probíhá postupně pro všechny ramena

Hned po druhém kroku následuje krok třetí. Úhly jsou přepočteny na délky pulzů a jsou uplatněny korekce. Poté jsou sestaveny komunikační řetězce a uloženy do paměti.

Korekce ve třetím kroku plynou z nepřesností konstrukce, ne zcela přesné velikosti výchozího úhlu natočení serv a z nepřesného rozsahu serva (plný rozsah 1600 μ s je těsně více než 90°). Tyto nepřesnosti způsobovaly, že koncový bod robotu vykazoval konzistentní odchylku od požadované polohy. Korekcemi byl vliv těchto nepřesností potlačen. Velikosti korekcí jsou popsány ve zdrojovém kódu.

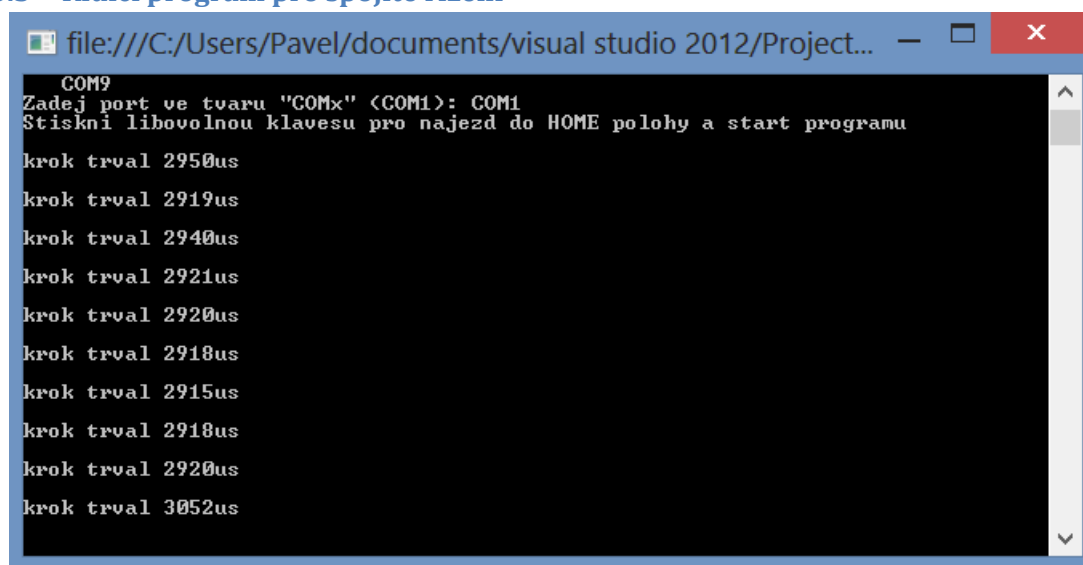
Během třetího kroku rovněž dochází k ještě jedné věci. Je porovnávána poloha ramen v minulém kroku s polohou ramen v tomto kroku a z ní jsou vypočteny rychlostní limity pohybu ramen. Cílem je, aby se v ideálním případě vždy pohybovala ramena stejně dlouhou dobu. To má důvod jednak z estetického hlediska, protože se pohyb zdá být plynulejší, a jednak kvůli alespoň částečnému napřímění trajektorie pohybu. Trajektorie sice není přímkou, ale alespoň se k ní blíží. Bez rychlostních omezení měl robot tendenci zvláště při delších pohybech se pohybovat po dlouhých obloukových neintuitivních trajektoriích.

Čtvrtým a posledním krokem je odeslání řetězce na dříve zadaný virtuální sérový port. O předání zprávy v nižších logických úrovních už se dále postará operační systém.

Po dokončení čtvrtého kroku program vypíše diagnostická data a čeká na další vstup uživatele. To je vlastnost plynoucí z experimentálního použití programu. Stejně tak by ale mohl robot automaticky načíst další krok instrukcí a pokračovat v běhu.

Program je napsán s využitím zásad objektového programování. Je vytvořena skupina objektů, například souřadný systém nebo ramena a ty jsou popsány svými vlastnostmi a pro ně relevantními metodami. Běh programu pak je úzce vázán na objekty. Například v prvním kroku se pracuje s objektem souřadného systému a uživatel popisuje jeho vlastnosti. V druhém kroku se pracuje se třemi objekty ramen. Ve třetím kroku s objektem kontroléru atd. Důvodem tohoto postupu je jednak zpřehlednění programu, a jednak jeho snazší modifikovatelnost a znovupoužitelnost částí kódu.

6.3.3 Řídicí program pro spojitě řízení



```
file:///C:/Users/Pavel/documents/visual studio 2012/Project...
COM9
Zadej port ve tvaru "COMx" <COM1>: COM1
Stiskni libovolnou klavesu pro najezd do HOME polohy a start programu

krok trval 2950us
krok trval 2919us
krok trval 2940us
krok trval 2921us
krok trval 2920us
krok trval 2918us
krok trval 2915us
krok trval 2918us
krok trval 2920us
krok trval 3052us
```

Obrázek 6-7: Okno programu spojitě řízení

Spojité řízení představuje základ všech moderních robotů. Proto samozřejmě nemohlo být vynecháno ani pro tento robot.

Program vychází z programu pro PTP řízení, ale nahrazuje uživatelské zadání souřadnic výpočtem souřadnic z funkce podle času. Pro vývoj byla do programu vložena demosekvence sestávající z kruhových a spirálových trajektorií, všech zadaných formou parametrických rovnic. Ale stejným způsobem je možné realizovat i například pohyb po přímce. Program potřebuje znát pouze tvar a směr trajektorie a žádanou rychlost, ze které dopočítá délku kroku.

Effektivně se stále jedná o PTP řízení, protože do serv je možné zasílat pouze žádanou polohu v pravidelných intervalech. Body si ale určuje sám počítač a dělá tak v natolik krátkých úsecích, že se dokáže velmi přiblížit skutečné spojitě trajektorii.

Pro co nejvyšší plynulost pohybu byla zvýšena frekvence řídicích pulzů až na maximum kontroléru na frekvenci 333Hz. Všechny pět serv tuto frekvenci bez potíží zvládne, takže to nepředstavuje problém. Frekvence 333Hz znamená aktualizaci polohy co 3ms. To je pevný strop, do kterého je nutné vtlačit všechny čtyři kroky programu. V rámci každé aktualizace je přitom nutné vyřešit několik desítek rovnic a zpracovat komunikační řetězce. K tomu už je zapotřebí ne zcela zanedbatelný výpočetní výkon. Naštěstí pro moderní osobní počítače to nepředstavuje velký problém.

Pro dosažení co největší efektivity a rychlosti byla zaměřena pozornost na čas průběhu jednotlivých kroků programu. Velké rezervy byly nalezeny zvláště v práci s dynamickou pamětí. První verze programu se v rámci úspory systémových prostředků snažily dynamickou paměť co nejvíce využívat. Pokud daná část paměti přestane být využívána, je navracena zpět operačnímu systému (respektive .NET frameworku) a tak může být použita k jinému účelu. Pokud ale má být použita znovu, je nutné si po systému opět blok paměti vyžádat a počkat na jeho alokování programu. To běh programu nepříjemně zdržuje. Proto byl program upraven tak, že využívá pouze staticky alokovanou paměť. Paměť je systémem přidělena při prvním cyklu a je mu vrácena až při ukončení programu. To sice zvyšuje nároky na paměť (které jsou ale u dnešních počítačů stejně zanedbatelné), ale výrazně zrychluje program. Podle měření byl počítač schopen provést veškeré výpočty a vybudování komunikačního řetězce v čase okolo 3 μ s. To je řádově rychleji, než je nezbytně nutné. Velká rezerva je ale ku prospěchu protože umožňuje běh i na mnohem pomalejších procesorech a nebo při větším zatížení procesoru jinými aplikacemi.

Z časového hlediska ale byl drobným zklamáním čtvrtý krok, odeslání řetězce na sériový port. K tomu je využito knihovny .NET, která ale má problémy s efektivitou. Čas včetně odeslání řetězce se pohybuje kolem 1ms. Omezení přitom není dané propustností sběrnice, ale rychlostí předávání dat operačnímu systému. Za předpokladu použití výkonného počítače čas 1ms nepředstavuje problém, ale pokud by měl program běžet na pomalejším procesoru, mohlo by být nutné použít jinou, rychlejší, komunikační knihovnu.

Bez ohledu na čas výpočtu je program omezen tak, aby aktualizaci prováděl v nejméně 3ms intervalech. Tím se kryje s aktualizací polohy serv v kontroléru a v ideálním případě tak je v synchronizaci s řídicími pulzy serv. V praxi není možné dokonalé synchronizace dosáhnout, protože počítač neběží na operačním systému reálného času a tak není možné garantovat skutečné časy. Pro účely tohoto robotu to však dostačuje.

6.3.4 Další vývoj

V době odevzdání této práce jsou ve vývoji paralelně dvě větve řídicího programu. Jedna se zaměřuje na grafické rozhraní a druhá na učení robotu.

První větev řeší problém uživatelsky nepřívětivého rozhraní nahrazením terminálového okna grafickým uživatelským rozhraním s možností nastavovat polohu pracovního bodu pomocí posuvníků a číselných políček. Představuje spíše nádstavbu stávajícího programu, protože využívá větší části jeho kódu a mění jen vzhled programu.

Druhá větev přidává možnost programování uživatelem. Existující verze programu umožňují buď zadávat body v průběhu programu, nebo zadat přímo do kódu programu žádanou trajektorii. Ani jeden ale neumožňuje programování uživatelem. Až tato větev tuto možnost přidává. Programování probíhá formou sepsání seznamu bodů do textového souboru a následným načtením a provedením tohoto souboru.

Jednotlivé body se zapisují do řádku jako posloupnost tří souřadnic bodu, natočení efektoru a otevření čelistí a řádek je zakončen hodnotou časového zpoždění dalšího příkazu. Všechny hodnoty jsou odděleny středníkem.

Zpracování probíhá tak, že program načte řádek, prvních pět hodnot vezme jako souřadnice shodně s PTP programem a provede je. Po provedení program stojí až do uplynutí časového intervalu zadaného jako šestá hodnota a měřeného od okamžiku načtení řádku. Po uplynutí intervalu načte další řádek a stejným způsobem pokračuje, až dokud nenarazí na konec souboru.

Jedná se o jednodušší programování PTP řízení. Na něj by potom měla navázat další verze programu s možností zadání trajektorií pro spojitě řízení.

Obě současné větve programu by se výhledově měly spojit do jednoho uživatelsky přívětivého programu s možností programování. V době odevzdání práce ale ještě není dokončena a odladěna ani jedna z větví.

7 Praktické zkušenosti a poznatky z provozu robotu

Tato kapitola by se měla věnovat hlavně vlastnostmi robotu jako finálního produktu. Část poznatků a doporučení už byla uvedena v části věnující se jednotlivým podsestavám a dílům, zde už budou pouze poznatky k celku.

Robot splňuje požadavky na něj kladené, nedosahuje ale takové míry přesnosti, jako bylo očekáváno. Důvodů je více, ale tím hlavním je nedostatečná tuhost a přílišná vůle některých částí konstrukce. Nejvíce se to týká ramen robotu. Zde se vyskytuje drobná vůle v kulových kloubech a vůle na pohonech. Vůle v kulových kloubech je daní za jejich levné provedení. Částečně by šla odstranit přitažením dolních částí ramen k sobě pružinami, podobně jako je to řešeno u profesionálních delta robotů. Druhou možností by bylo použít dražší klouby. Vliv vůle v kloubech je nicméně malý v porovnání s vůlí na pohonech.

Největším problémem pro přesnost je vůle na pohonech. Přestože její úhlová velikost je malá a při provozu bez ramen až neznatelná, při délce ramen se i tato drobná vůle projeví. Celkový efekt na přesnost to má tu, že největší opakovatelná přesnost robotu je cca 1mm. To je sice s ohledem na účel přijatelná hodnota, celkově ale představuje zklamání. V rámci dalšího vývoje robotu by pro eliminaci této vůle bylo nutné nahradit serva jinou pohybovou jednotkou s menšími vůlemi.

Problém s tuhostí se vyskytuje především u horní části ramen v krutu. Protože návrh s krutem nepočítal, nejsou na něj vůbec připraveny. To má vliv na nedostatečnou tuhost spodní plošiny proti naklápění. V běžném provozu by se to nemělo příliš projevovat, nicméně problém je přítomen. Odstranit by jej šlo částečně překonstruováním horní části ramene. Zcela by to ale problém nevyřešilo, protože ke krutu dochází i mezi unašečem a osou serva. V tomto místě je tuhost bez výměny pohonu neřešitelná.

V mnohem menší míře se projevuje nedostatečná tuhost u nosného rámu. Ten je sice dostatečně tuhý na to, aby neměl vliv na přesnost robotu, nicméně za provozu se objevují jeho vibrace. Pro odstranění by bylo zapotřebí konstrukci rámu dále vyztužit nebo změnit.

Druhá velká výhrada k robotu souvisí se spojitým pohybem. Přestože ze strany řídicího systému ani software by neměl být problém, praktické testy ukázaly, že plynulý pohyb robotu je problematický. U rychlých dlouhých pohybů je pohyb robotu příkladný a podle očekávání. Při pomalejších a kratších pohybech ale začíná koncový bod robotu silně kmitat. Pravděpodobný důvod problému leží v polohovém řízení modelářských serv. Pro použití v modelářství je žádoucí, aby servo dojelo co nejrychleji do žádané polohy a zde opět co nejrychleji zastavilo. Tohle agresivní nastavení interního PID regulátoru ale způsobuje, že pokud je změna polohy mezi pulzy příliš malá, servo jí dosáhne a začne prudce brzdit. S dalším pulzem dostane novou polohu, takže naopak začne plně akcelarovat, aby mohlo ještě před příchodem dalšího pulzu znovu začít brzdit. Pohyb tak není plynulý ale skokový, což se projevuje jako rozkmit koncového bodu.

Částečným řešením problému bylo zvýšení frekvence serv na frekvenci 333Hz. Tím se zkrátila nejkratší změna natočení, při které dochází k vibracím. O úplné řešení ale nejde. Jiné jednoduché řešení problému nebylo nalezeno. Teoreticky je možné problém vyřešit přeprogramováním PID regulátoru serv nebo nahrazením serv za jiný typ pohonu.

8 Cenové zhodnocení

Náklady na stavbu prototypu robotu jsou v tabulce:

Součást	Cena za kus	Cena celkem
Serva 3ks velké+2ks malé	945 Kč/393 Kč	3621 Kč
Uhlíkové trubky 3ks	120 Kč	360 Kč
Hliníkové profily 3ks+3ks	128 Kč/100 Kč	684 Kč
Plexisklové kryty 3ks	350 Kč	1050 Kč
Kulové klouby 12ks	70 Kč	840 Kč
Podstavná deska	390 Kč	390 Kč
Kontrolér serv	1091 Kč	1091 Kč
Drobný materiál	cca 200 Kč	200 Kč
Celkem		8236 Kč

Základní cena robotu je tedy 8236 Kč. Skutečné náklady na stavbu byly o něco vyšší, protože v propočtu nejsou zahrnuty náklady na dopravu dílů.

V ceně rovněž není zahrnuta cena tištěných dílů. V případě komerční výroby by jejich cena byla 8364 Kč, což by cenu robotu zvýšilo na dvojnásobek. Pro výrobu robotu v rámci malosériové výroby by ale nebyly kladeny takové požadavky na přesnost a šlo by cenu výrazně snížit. Celková cena robotu by se tak mohla vměstnat pod hranici **10 000 Kč**

Cena robotu je ve výsledku velmi nízká. Vykoupena je samozřejmě horšími provozními parametry, zvláště v porovnání s profesionálními roboty. Pro prezentační a výukové účely ale jsou parametry dostačující a cena velmi přijatelná.

9 Závěr

Smyslem práce byl návrh a především realizace malého paralelního robotu. Tento hlavní cíl byl naplněn, neboť tento robot existuje, funguje a je velmi dobře použitelný pro svůj zamýšlený účel.

Projekt se však neobešel bez obtíží, z nichž některé se nepodařilo zcela vyřešit. Hlavními dvěma problémy je nepřesnost robotu, jak po stránce dosažení polohy koncového bodu, tak po stránce plynulosti pohybu, a nevhodně řešený efektor robotu. V obou případech bylo navrženo možné řešení problému, nicméně z různých důvodů, mimo jiné časových už jejich řešení není zahrnuto do práce. Robot by tak i přes svou okamžitou použitelnost mohl být vhodným objektem pro další zdokonalování.

To samé platí po softwareové stránce. Práce se sice zabývá i tvorbou řídicího software, nicméně nejde dostatečně do hloubky. Plné využití možností robotu by mohlo být náplní samostatné diplomové práce.

Práce byla velmi zajímavá i pro další profesní růst. Běžný student nedostává příliš často možnost zapojit se přímo do většího projektu směřujícího k realizaci. Přitom právě s realizací se pojí řada problémů jen stěží postihnutelných teoretickou výukou. Přestože jde pouze o školní projekt, zvládnutí problémů bylo velmi dobrou zkušeností a impulzem do budoucna.

Jako závěrečné shrnutí je možné prohlásit práci za úspěšnou a zkonstatovat, že portfolio robotů katedry robototechniky se úspěšně rozšířilo o další kus.

10 Seznam použité literatury

- [1] MERLET, Jean-Pierre. *Parallel Robots*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000, 355 s. ISBN 07-923-6308-6.
- [2] Delta Parallel Robot — the Story of Success. *ParalleMIC* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.parallemic.org/Reviews/Review002.html>
- [3] ZARKANDI, Soheil. Kinematics of a star-triangle planar parallel manipulator. [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs12206-011-0931-9.pdf>
- [4] Review of Stewart platforms. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://robotics.caltech.edu/~jwb/courses/ME115/handouts/ReviewStewartPlatform.pdf>
- [5] Redundant modular robot. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/5103403.html>
- [6] YIME, Eugenio, Héctor MORENO a Roque SALTARÉN. A Novel 6 dof Parallel Robot With Decoupled Translation and Rotation. [online]. 2011 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://somim.org.mx/conference_proceedings/pdfs/A12/A12_359.pdf
- [7] High-Speed Parallel Robot HEXA. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.space.mech.tohoku.ac.jp/research/hexa/hexa-e.html>
- [8] 131:1 Metal Gearmotor 37Dx57L mm with 64 CPR Encoder. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.pololu.com/catalog/product/1447>
- [9] Actuators - Servos. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.societyofrobots.com/actuators_servos.shtml
- [10] Hyperion Atlas High Voltage DH20-UTD Servo. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.hyperion-world.com/products/product/HP-DH20-UTD>
- [11] Robotis - Dynamixel [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.robotis.com/xe/dynamixel_en
- [12] Stepper Motor: Bipolar, 200 Steps/Rev, 35×28mm. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.pololu.com/catalog/product/1208>
- [13] Microhydraulics. *Hydro Leduc* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.hydroleduc.com/images/stories/catalogues_PDF/anglais/HYDRO%20LEDUC%20DOCUMENTATION_English/MICROHYDRAULICS/micro-hydraulics%20net.pdf
- [14] *Micro Hydraulics Ltd.* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.microhydraulics.ie/>
- [15] Micromotors. *All Air* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.allair.com/micromotors.htm>
- [16] L12 Series. *Firgelli Technologies* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.firgelli.com/products.php?id=41>
- [17] *Dynalloy, Inc.* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.dynalloy.com/index.php>
- [18] *Miga Motor Company* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.migamotors.com/>

- [19] SMC Corporation [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.smc.eu/portal/WebContent/main/index.jsp?is_main=yes
- [20] Bosch Rexroth. The Drive & Control Company [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.boschrexroth.com/en/xc/>
- [21] DAERDEN, Frank a Dirk LEFEBER. Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://lucy.vub.ac.be/publications/Daerden_Lefeber_EJMEE.pdf
- [22] Fluidic muscle. Festo [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: http://www.festo.com/cms/en_corp/9790.htm
- [23] Metric Series Bearings - DDL-1060. NMB Technologies [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.nmbtc.com/bearings/part-numbers/search/DDL-1060/4311>
- [24] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 128 s. ISBN 978-80-248-1860-3.
- [25] Hyperion Atlas Digital Servo – Setup guide. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://media.hyperion.hk/dn/at-ser/ATLAS-MAN-EN-PG2.pdf>
- [26] Hyperion Atlas Digital Servo – Programming manual. [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://media.hyperion.hk/dn/pc/doc/ATLAS-PROGMAN-EN.pdf>
- [27] USB to UART Bridge. Silicon Labs [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.silabs.com/products/interface/usbtouart/Pages/usb-to-uart-bridge.aspx>
- [28] Pololu Maestro Servo Controller User's Guide. Pololu [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.pololu.com/docs/0J40>
- [29] Ubuntu: Hacking the HC-06 bluetooth module. Embedded Programmer [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://embeddedprogrammer.blogspot.cz/2012/06/ubuntu-hacking-hc-06-bluetooth-module.html>
- [30] TSAI, Lung-Wen. *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*. New York: Wiley, c1999, xiii, 505 s. ISBN 04-713-2593-7.
- [31] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2007, 1 CD-R. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [32] SKAŘUPA, Jiří. *Roboty a manipulátory*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2613-4.
- [33] ČERNÝ, Michal. Modelářská serva v robotice. *Robot Revue*. 2010, roč. 2, č. 2.
- [34] ČERNÝ, Michal. Digitální modelářská serva. *Robot Revue*. 2010, roč. 2, č. 3.

11 Seznam příloh

Výkresy:

DOL273-DP-01-01	Paralelní robot - sestava
DOL273-DP-04-02	Rameno – horní část
DOL273-DP-04-02-01	Rameno – horní část - kusovník
DOL273-DP-04-03	Rameno – spodní část
DOL273-DP-03-04	Horní rám
DOL273-DP-03-05	Spodní plošina s efektozem
DOL273-DP-04-05-01	Spodní plošina s efektozem – kusovník

